

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

**Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue**

**Influence des facteurs climatiques sur la performance de la nappe phréatique  
surélevée combinée à un recouvrement monocouche**

**ELODIE LIEBER**

Département de Génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie Minéral

Août 2019

# **POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

**Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue**

Ce mémoire intitulé :

## **Influence des facteurs climatiques sur la performance de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche**

présenté par **Elodie LIEBER**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

**Bruno BUSSIÈRE**, président

**Isabelle DEMERS**, membre et directrice de recherche

**Thomas PABST**, membre et codirecteur de recherche

**Anne-Marie DAGENAI**S, membre

## DÉDICACE

*« Nous n'héritons pas de la terre de nos parents, nous l'empruntons à nos enfants »*

*Antoine de Saint-Exupéry*

*À Alexandre le futur grand frère*

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu ma directrice de recherche Isabelle Demers qui m'a proposée ce sujet de recherche. Celui-ci a tout de suite piqué ma curiosité et mon intérêt par son aspect concernant les changements climatiques. Je la remercie ainsi que mon co-directeur Thomas Pabst pour leurs enseignements, leur disponibilité, leur encadrement et leur soutien durant toute la durée de ma maîtrise.

Merci à notre partenaire Iamgold pour nous avoir donné accès au site Doyon-Westwood ainsi qu'aux membres de l'équipe Environnement Mario Gagnon et Martin Demontigny pour leur disponibilité et leur aide.

Merci aux techniciens de l'URSTM pour l'encadrement et l'aide technique dans le cadre des essais en laboratoire et du suivi des cellules de terrain, en particulier Bini Mangane, Mélanie Bélanger, Pierre-Alain Jacques et Sylvette Awoh. Merci à Émilie Bresson pour sa précieuse collaboration sur le volet des changements climatiques et également à Vincent Martin de Polytechnique pour le support sur la modélisation numérique.

Merci à l'ensemble des professeurs de l'IRME qui m'ont permis d'acquérir un bagage théorique très varié et complet, qui me servira dans la suite de ma carrière professionnelle. Merci également au personnel administratif, et en particulier Louise Labbé et Nancy Labonté, pour leur disponibilité.

À cause de la distance, je n'ai pas eu l'opportunité de côtoyer mes collègues étudiants aussi souvent que je l'aurais souhaité, mais ces ponctuels moments de rencontres ont été très agréables et enrichissants. Merci aux comités étudiants du CERME et de l'ICM-UQAT pour l'organisation d'événements très enrichissants auxquels j'ai pu participer.

Merci à Sophie Turcotte du MERN pour sa confiance et son entrain à défendre mon embauche espérée au sein de la DRSM.

Un énorme merci à mon conjoint Ronan pour son soutien pendant cette folie de reprendre des études universitaires, ce qui m'a permis de concilier plus facilement les rôles de maman, d'étudiante et travailleuse à temps partiel. Et pour finir, un gros câlin à mon fils Alexandre pour son sourire qui est la meilleure des motivations.

## RÉSUMÉ

Sur un site minier, l'une des infrastructures les plus imposantes et pouvant présenter une problématique environnementale importante est le parc à résidus miniers. Ces résidus, issus du processus de traitement du minerai, peuvent encore contenir une quantité parfois importante de sulfures. La réaction chimique de ces sulfures avec l'eau et l'oxygène est responsable du drainage minier acide (DMA). Il se caractérise par un faible pH et des concentrations en métaux et en sulfates élevés, paramètres nocifs pour l'environnement si celui-ci n'est pas contrôlé. Afin de limiter la génération de DMA, il est important, dès le début de vie de l'exploitation minière, d'élaborer un plan de restauration pour le parc à résidus. Les méthodes de restauration ont pour but d'éliminer l'une des trois composantes de l'oxydation des sulfures, soit l'eau, l'oxygène ou les sulfures eux-mêmes.

En climat humide, les méthodes de restauration utilisées privilégient l'exclusion de l'oxygène comme la méthode de la nappe phréatique surélevée. Associé à un recouvrement monocouche, cette technique permet de maintenir la nappe phréatique à un niveau optimal permettant aux résidus de demeurer saturés ou proche de la saturation, limitant ainsi l'oxydation des sulfures et la génération de DMA. Cette technique est intrinsèquement dépendante des précipitations qui vont en grande partie être responsable de la fluctuation du niveau de la nappe phréatique au sein du parc à résidus. Les changements climatiques attendus d'ici 2100 vont avoir pour conséquence un changement dans le régime de précipitations. Au Québec, des variations importantes des températures et des précipitations moyennes annuelles ainsi qu'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes sont attendus. L'augmentation des précipitations aurait un impact positif sur le scénario de restauration, alors que les périodes de sécheresse pourraient la rendre inefficace à stopper la génération de DMA.

L'objectif de ces travaux est d'étudier la performance à long terme de la méthode de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche dans le contexte des changements climatiques. Cette méthode de restauration doit être mise en place sur les parcs à résidus du site minier Doyon-Westwood (Cadillac, Québec). Afin de tester cette méthode, des cellules de terrain ont été construites sur le site. Un suivi hydrologique et géochimique a été réalisé de 2015 à 2018. Les matériaux utilisés pour la construction des cellules ont été caractérisés au laboratoire en 2015 lors de la construction des cellules afin de déterminer en particulier la conductivité hydraulique

saturée et la courbe de rétention d'eau. De nouveaux essais ont été réalisés dans le cadre de cette étude afin de confirmer les résultats obtenus en 2015.

Un modèle numérique 1D a été bâti à l'aide du logiciel SEEP/W afin de représenter les cellules de terrain. Le modèle a été calibré en utilisant les données météorologiques de la station de Rouyn-Noranda et en modifiant les propriétés des matériaux afin de reproduire les données de teneurs en eau volumiques obtenus lors du suivi des cellules sur le terrain. Le parc à résidus #2 a par la suite été également simulé numériquement en utilisant l'épaisseur moyenne de résidus Doyon et un recouvrement monocouche d'un mètre de résidus désulfurés Westwood.

Afin d'intégrer les changements climatiques, plusieurs modèles climatiques ont été utilisés selon deux scénarios radiatifs (RCP4.5 et RCP8.5). Un total de 18 simulations climatiques a ainsi été obtenu. Dans le cadre de ces travaux, trois scénarios issus de ces simulations ont été utilisés dont un représentant le pire scénario possible pour la méthode de restauration soit une faible augmentation des précipitations combiné à une augmentation importante des températures.

Les variables climatiques des trois scénarios climatiques sélectionnés ont été intégrées aux modèles numériques (cellules et parc #2) afin de simuler l'évolution du comportement hydrogéologique de la méthode de restauration de 2020 à 2100. Les différentes simulations réalisées ont démontré l'impact principal des paramètres tel que le niveau de la nappe phréatique et les propriétés des matériaux. L'épaisseur du recouvrement monocouche peut également être optimisé afin d'améliorer le comportement de la méthode de restauration. Lorsque les paramètres de design de la méthode de restauration mentionnés précédemment sont optimisés, la saturation des résidus Doyon qui traduit la bonne performance de la méthode est assurée même dans le cas du pire scénario climatique utilisée. Cette observation a également été faite dans le cas des deux autres scénarios climatiques dont les résultats n'ont pas démontré de différences significatives.

## ABSTRACT

On a mine site, one of the largest and potentially significant environmental issues is the tailings management facility. Tailings, from the ore processing process, may still contain a large quantity of sulphides. The chemical reaction of these sulphides with water and oxygen is responsible for acid mine drainage (AMD). It is characterized by low pH and high concentrations of metals and sulphates, which are harmful to the environment if not controlled. In order to limit the generation of AMD, it is important from the beginning of the mining operation, to develop a reclamation plan for the tailings management facility. Reclamation methods are intended to remove one of the three components of sulphide oxidation: water, oxygen or sulphides.

In wet climates, the reclamation methods used favour the exclusion of oxygen, such as the method of the elevated water table combined with a monolayer cover. This technique allows the water level to be maintained at an optimal level allowing the tailings to remain saturated or close to saturation, thus limiting the oxidation of sulphides and the generation of DMA. This technique is inherently dependent of precipitations, which will largely be responsible for water level variations within the tailings facility. The expected climate change by 2100 will result in a change in precipitation patterns. In Quebec, significant changes in annual average temperatures and precipitation and an increase in the frequency and intensity of extreme events are expected. Increased precipitations would have a positive impact on the reclamation scenario, while periods of drought could make it ineffective in stopping the generation of AMD.

The objective of this study is to investigate the long-term performance of the elevated water table method combined with a monolayer cover in the context of climate change. This reclamation method is to be implemented at the tailings facility of the Doyon-Westwood mine site (Cadillac, Québec). In order to test this method, field cells were constructed on the site. Hydrological and geochemical monitoring was conducted from 2015 to 2018. The materials used for cell construction were characterized in the laboratory in 2015 during cell construction to determine saturated hydraulic conductivity and the water retention curve of the materials. New tests were conducted as part of this study to confirm the results obtained in 2015.

A 1D numerical model was built using the SEEP/W software to represent the cells. The model was calibrated using meteorological data from the Rouyn-Noranda station and modifying the hydrological properties of the materials to reproduce the data of volumetric water content obtained

during cell monitoring in the field. The Doyon tailings ponds #2 was then numerically simulated using the average Doyon tailings thickness and a monolayer cover of one-metre thickness made with desulfurized Westwood tailings.

In order to integrate climate change, several climate models according to two radiative scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) were used. A total of 18 climate simulations were obtained. As part of this study, three climate scenarios from these simulations were used, including one representing the worst-case scenario for the reclamation method with a small increase in precipitation combined with a significant increase in temperatures.

Climate parameters from the three selected climate scenarios were integrated into the numerical models (field cells and ponds #2) to simulate the behaviour evolution of the reclamation method from 2020 to 2100. The various numerical simulations carried out demonstrated the main impact of parameters such as water table level and material properties. The thickness of the monolayer cover can also be optimised to improve the behaviour of the reclamation method. When the design parameters of the reclamation method mentioned above are optimized, saturation of the Doyon tailing which reflects the good performance of the method is ensured even in the case of the worst case scenario used. This observation was also made for the other two climate scenarios whose results did not show significant differences.



## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT .....	VII
TABLE DES MATIÈRES .....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIV
LISTE DES FIGURES .....	XVI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XIX
LISTE DES ANNEXES .....	XXIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Caractérisation du drainage minier acide .....	1
1.2 Contrôle du drainage minier acide .....	3
1.2.1 Exclusion des sulfures .....	4
1.2.2 Exclusion de l'eau .....	4
1.2.3 Exclusion de l'oxygène .....	4
1.3 Impact des changements climatiques sur les méthodes de restauration .....	6
1.4 Contexte et objectifs du projet de recherche .....	7
1.5 Contenu du mémoire .....	9
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE .....	10
2.1 Principes de la circulation de l'eau dans un milieu poreux .....	10
2.1.1 Écoulements en milieu saturé.....	10
2.1.2 Écoulements en milieu non saturé.....	11
2.2 Caractéristiques hydriques des matériaux .....	12

2.2.1	Courbe de rétention en eau.....	13
2.2.2	Conductivité hydraulique saturée.....	16
2.2.3	Fonction de perméabilité et conductivité hydraulique non saturée.....	17
2.3	Mécanisme de diffusion de l'oxygène dans un milieu poreux.....	18
2.4	Bilan hydrique.....	20
2.4.1	Évaporation.....	20
2.4.2	Remontée capillaire.....	22
2.5	Technique de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche.....	23
2.5.1	Concept théorique.....	23
2.5.2	Mise en place de la nappe phréatique surélevée.....	25
2.5.3	Recouvrement monocouche.....	26
2.5.4	Synthèse des travaux de recherche.....	27
2.5.5	Vulnérabilité aux changements climatiques.....	35
2.6	Facteurs et changements climatiques.....	36
2.6.1	Définitions et concepts de la modélisation climatique.....	36
2.6.2	Techniques de mise à l'échelle.....	38
2.6.3	Techniques de post-traitement.....	39
2.6.4	Scénario de forçage radiatif (RCP).....	41
2.7	Changements climatiques attendus pour la région de l'Abitibi.....	43
2.8	Simulations numériques.....	45
2.8.1	Caractéristiques du code numérique SEEP/W.....	46
2.8.2	Interaction entre la surface du sol et le climat.....	47
CHAPITRE 3	MATERIEL ET MÉTHODE.....	49
3.1	Site à l'étude.....	49

3.2	Caractérisation des matériaux .....	52
3.2.1	Granulométrie.....	54
3.2.2	Densité relative des grains.....	55
3.2.3	Porosité et indice des vides .....	55
3.2.4	Conductivité hydraulique saturée.....	55
3.2.5	Courbes de rétention d'eau.....	57
3.2.6	Fonctions de perméabilité .....	60
3.3	Données climatiques .....	62
3.3.1	Données météorologiques actuelles .....	62
3.3.2	Scénarios climatiques d'ici la fin du siècle pour le site Doyon-Westwood .....	62
CHAPITRE 4 ARTICLE 1: EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON THE PERFORMANCE OF A MONOLAYER COVER COMBINED WITH AN ELEVATED WATER TABLE TO PREVENT ACID MINE DRAINAGE.....		68
4.1	Abstract .....	68
4.2	Résumé.....	68
4.3	Introduction .....	69
4.4	Site description.....	71
4.4.1	Location and previous investigation .....	71
4.4.2	Experimental field cells.....	72
4.4.3	Climate change projections for Abitibi region.....	73
4.5	Numerical modeling.....	74
4.5.1	Material characterization.....	74
4.5.2	Model setup and calibration .....	75
4.5.3	Influence of climatic conditions.....	76
4.6	Preliminary results.....	77

4.7	Discussion .....	79
4.8	Conclusion and upcoming work.....	80
4.9	Acknowledgements .....	80
4.10	References .....	81
CHAPITRE 5 ARTICLE 2: EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON THE HYROGEOLOGIC BEHAVIOUR OF A MONOLAYER COVER COMBINED WITH AN ELEVATED WATER TABLE .....		86
5.1	Abstract .....	86
5.2	Introduction .....	87
5.2.1	Elevated water table combined with a monolayer cover.....	87
5.2.2	Climate change projection concepts and apprehended changes for the studied region	88
5.3	Site description.....	91
5.3.1	Location and reclamation plan .....	91
5.3.2	Experimental field cells.....	92
5.4	Methodological approach.....	93
5.4.1	Material characterization.....	93
5.4.2	Model setup and calibration .....	94
5.4.3	Projection of future climate conditions .....	100
5.5	Results .....	102
5.5.1	Effect of future climate conditions on the performance of the field cells.....	102
5.5.2	Application to the tailings pond .....	106
5.6	Discussion .....	111
5.7	Conclusion & Recommendations.....	112
5.8	Acknowledgements .....	113
5.9	References .....	113

CHAPITRE 6	DISCUSSION GÉNÉRALE .....	120
6.1	Niveau initial de la nappe phréatique .....	120
6.2	Données de neige .....	123
6.3	Albédo .....	127
CHAPITRE 7	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....	129
7.1	Sommaire .....	129
7.2	Recommandations .....	132
RÉFÉRENCES	.....	135
ANNEXES	.....	153

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Synthèse des travaux de recherche récents effectués sur la méthode de restauration (adapté de Ethier, 2018) .....	28
Tableau 2.2 : Paramètres principaux influençant la performance de la technique de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche .....	34
Tableau 2.3 : Caractéristiques des différents scénarios RCP (adapté de Moss et al., 2010).....	42
Tableau 2.4 : Liste des indicateurs climatiques quantitatifs (adapté de Roy, 2015) .....	44
Tableau 2.5 : Liste des indicateurs climatiques qualitatifs (adapté de Roy, 2015) .....	44
Tableau 2.6 : Augmentation projetée pour les paramètres climatiques quantitatifs selon les deux scénarios RCP utilisé pour différents horizons temporels (adapté de Roy, 2015) .....	45
Tableau 3.1 : Paramètres granulométriques et densité relative des grains des résidus étudiés .....	55
Tableau 3.2 : Résultats des conductivités hydrauliques saturés (mesurée) et prédites (modèle KCM) des résidus étudiés. ....	56
Tableau 3.3 : Paramètres de van Genuchten (1980) des CRE des résidus étudiés. ....	58
Tableau 3.4 : Liste des modèles climatiques utilisés pour obtenir les différentes simulations à la station de Val-d'Or Aéroport (adapté de Bresson, 2019; à paraître). ....	65
Tableau 3.5 : Variations moyennes des températures et des précipitations des simulations climatiques sélectionnées. ....	67
Tableau 4.1 : Evolution of the climatic parameters of precipitations for three temporal horizons and two RCP scenarios for the region of Abitibi compared to 1981-2000 data (Roy, 2015).....	73
Tableau 4.2 : Theoretical (Rey et al., 2017) and calibrated values of material properties.....	75
Tableau 5.1 : Evolution of the climate indicators for three temporal horizons and for two RCP scenarios for the region of Abitibi compared to historical period 1981-2000 (adapted from Roy, 2015. ....	91
Tableau 5.2 : Calibrated values of Doyon and Goldex properties obtain by calibration of the numerical model .....	95

Tableau 5.3 : Temperature and precipitation variations of the selected climate scenarios used for the numerical model with SEEP/W.....	101
Tableau 5.4 : Laboratory (LV) and tested (TV) values of Westwood tailings.....	109

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Étapes de la formation du DMA (adapté de Aubertin, Bussière et Bernier, 2002) .....	2
Figure 1.2 : Comparaison entre les moyennes historiques (1961-1990) et les scénarios de changements (2041-2070) des températures et des précipitations hivernales et estivales (tiré de Desjarlais et Blondlot, 2010).....	7
Figure 2.1 : Volume unitaire de sol et bilan de débits illustrant le principe de continuité (adapté de Hillel, 2004) .....	11
Figure 2.2 : Courbes de rétention d'eau théoriques a) et fonctions de perméabilité b) théoriques d'un sable et d'un silt (Aubertin et al., 2002).....	13
Figure 2.3 : Nomenclature, profils de teneur en eau et de pression au-dessus et en dessous d'une nappe phréatique (adapté de Cosset, 2009).....	23
Figure 2.4 : Méthode de restauration de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche (URSTM, 2017).....	24
Figure 2.5 : Comparaison entre le coefficient de diffusion de l'oxygène $D_e$ mesuré pour différent matériel en fonction du degré de saturation $S_r$ et le modèle de Colin (1987) .....	24
Figure 2.6 : Processus affectant l'efficacité de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche (URSTM, 2017) .....	36
Figure 2.7 : Exemple d'une procédure de transformation sur distribution : distribution Gamma des précipitations et distribution Gaussienne des températures (Teutschbein et Seibert, 2012). .	41
Figure 2.8 : Évolution temporelle du forçage radiatif selon les différents scénarios RCP (Roy, 2015) .....	42
Figure 3.1 : Vue aérienne du site Doyon-Westwood (adapté de Rey et al., 2016) .....	50
Figure 3.2 : Photographie des trois cellules expérimentales sur le site Doyon-Westwood .....	51
Figure 3.3 : Vue en coupe de la géométrie des cellules expérimentales #1 et #2 et de l'instrumentation en place (adapté de Rey et al., 2016).....	53
Figure 3.4 : Courbes granulométriques des résidus Doyon, Goldex et Westwood (d'après Rey et al., 2017).....	54



Figure 3.5 : Comparaison entre les conductivités hydrauliques saturées mesurées et prédites pour les résidus étudiés .....	57
Figure 3.6 : Résultats des essais réalisées en cellule Tempe et courbes de rétention d'eau selon le modèle de van Genuchten (1980) et MK pour les matériaux a) Doyon, b) Goldex et c) Westwood.....	59
Figure 3.7 : Fonctions de perméabilités obtenu à partir des essais en cellule Tempe pour les matériaux .....	61
Figure 3.8 : Localisation des principales villes, sites miniers étudiés, stations météorologiques utilisées dans le cadre du projet FRQNT (Bresson, 2019; à paraître).....	63
Figure 3.9 : Évolution des paramètres climatiques pour la station de Val-d'Or de 1940 à 2100 : a) température moyenne, b) précipitations moyennes annuelles (Bresson, 2019; à paraître). ...	65
Figure 3.10 : Diagramme de dispersion des différents scénarios climatiques pour la station Val-d'Or Aéroport (adapté de Bresson, 2019; à paraître). .....	66
Figure 4.1 : Configuration and instrumentation of field cell #1 (Rey et al., 2017).....	72
Figure 4.2 : Precipitations in mm imposed in the model for a normal climate (year 2016; blue) and for the SCCS (red).....	77
Figure 4.3 : Comparison between measured VWC (solid line), simulated with normal climate (pale line) and simulated with SCCS (dashed line).....	78
Figure 4.4 : Simulated water level elevation (m) for the normal climate (green) and for the SCCS (orange) for year 2016 (0 m = cell bottom). Red line corresponds to ½ AEV Doyon tailing value. ....	79
Figure 5.1 : Configuration and instrumentation of field cell (adapted from Rey et al., 2017) .....	92
Figure 5.2 : Cumulative volumetric grain size curve of tested materials.....	93
Figure 5.3 : Tempe cell results, WRC van Genuchten model (a) and permeability functions (b) for Doyon, Goldex and Westwood tailings.....	94
Figure 5.4 : Schematic representation of numerical model of field cells.....	96

Figure 5.5 : Comparison between field VWC measurements and simulated calibration for 2015-2018 period for Cell #1 .....	98
Figure 5.6 : Comparison between field VWC measurements and simulated calibration for 2015-2018 period for Cell #2 .....	99
Figure 5.7 : Evolution from 2020 to 2100 of mean annual temperature (a) and mean annual precipitation (b), for the three selected climatic scenarios at the Val-d'Or station.....	101
Figure 5.8 : Volumetric water content (VWC) evolution for cell #1 for the year with the least rain and the rainiest summer for the selected climate scenarios .....	104
Figure 5.9 : Volumetric water content (VWC) evolution from cell #2 for the year with the least rain and the rainiest summer for the selected climate scenarios .....	105
Figure 5.10 : Schematic representation of numerical model of tailing pond #2 of Doyon-Westwood .....	106
Figure 5.11 : Water table level and precipitations (left) and degree of saturation (right) evolution from 2020 to 2100 with IPSL-CM5A-MR scenario: Monolayer cover = 1 m (a) or 2.1 m (b) .....	108
Figure 5.12 : Water table level and precipitations (left) and degree of saturation (right) evolution from 2020 to 2100 with selected climate scenarios .....	110
Figure 6.1 : Comparaison de la modélisation du niveau de la nappe phréatique selon la valeur initiale du niveau de la nappe phréatique ( $\frac{1}{2}$ PEA ou 1 PEA): a) 2031 et b) 2045.....	121
Figure 6.2 : Modélisation du degré de saturation selon la valeur initiale du niveau de la nappe phréatique ( $\frac{1}{2}$ PEA ou 1 PEA) appliquées au modèle numérique en 2031 et 2045.....	123
Figure 6.3 : Impact de l'utilisation de la fonction « Données de neige » (2080) : a) Évolution du niveau de la nappe phréatique et b) Évolution des températures et précipitations .....	125
Figure 6.4 : Impact de l'utilisation de la fonction « Données de neige » (2075-2076) : a) Évolution du niveau de la nappe phréatique et b) Évolution des températures et précipitations. ....	126
Figure 6.5 : Comparaison de la modélisation du niveau de la nappe phréatique selon les valeurs d'albédo appliquées au modèle numérique : a) 2031 et b) 2059.....	128

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

$A$	Inverse de l'humidité relative à la surface du sol [-]
$\alpha_c$	Paramètre lié aux propriétés géotechniques (modèle MK) [-]
AEV	Air entry value [L]
$a_s$	Constante de régression (rayonnement ondes courtes)
$\alpha_{vG}$	Paramètre d'ajustement (modèle de van Genuchten) [L <sup>-1</sup> ]
$B$	Inverse de l'humidité relative de l'air [-]
$b_s$	Constante de régression (rayonnement ondes courtes)
CEBC	Couverture avec effet de barrière capillaire
CMIP	Coupled Models Intercomparison
CORDEX	Coordinated regional climate downscaling experiment
CRE	Courbe de rétention d'eau
$C_{O_2}$	Concentration de l'oxygène [ML <sup>-3</sup> ]
$C_p$	Constante (modèle KCM) [M <sup>2</sup> L <sup>-4</sup> ] ou Chaleur spécifique
$C_u$	Coefficient d'uniformité [-]
$C_\psi$	Paramètre d'ajustement [-]
$D$	Drainage vers la nappe phréatique [LT <sup>-1</sup> ]
DMA	Drainage minier acide
$D_a^0$	Coefficient de diffusion libre de l'oxygène dans l'air [L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup> ]
$D_e$	Coefficient de diffusion effectif de l'oxygène [L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup> ]
$d_r$	Distance relative inverse Terre-Soleil [L]
$D_w^0$	Coefficient de diffusion libre de l'oxygène dans l'eau [L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup> ]
$D_{10}$	Diamètre des grains correspondant à 10% de passant [L]
$D^*$	Coefficient de diffusion apparent [L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup> ]
$E$	Efficacité d'une méthode de restauration [-] ou Évaporation [LT <sup>-1</sup> ]
$e$	Indice des vides [L <sup>-1</sup> ]
$E_a$	Flux effectif d'énergie provenant du vent [LT <sup>-1</sup> ]

ECCC	Environnement et changements climatique Canada
$F_C$	Flux d'oxygène à travers la couverture [ $\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$ ]
FDC	Fonction de répartition
$F_{obs}$	FDC des données d'observation
$F_{rcm}$	FDC des données simulées
$F_0$	Flux d'oxygène dans les résidus sans scénario de restauration [ $\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$ ]
$G$	Flux de chaleur du sol (fine couche sous la surface) [ $\text{W.m}^{-2}$ ]
$G_{sc}$	Constante solaire [ $\text{MJ.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$ ]
$H$	Constante de Henry [-] ou Flux de chaleur sensible [ $\text{W.m}^{-2}$ ]
$h_{co}$	Remontée capillaire équivalente [L]
$k$	Conductivité hydraulique non saturée [ $\text{LT}^{-1}$ ]
$k_r$	Conductivité hydraulique relative [-]
$K_r$	Coefficient du taux de réaction [ $\text{T}^{-1}$ ]
$K_r^*$	Coefficient du taux de réaction apparent [ $\text{T}^{-1}$ ]
$k_{sat}$	Conductivité hydraulique saturée [ $\text{LT}^{-1}$ ]
$L_e$	Chaleur latente de vaporisation [ $\text{MJ.kg}^{-1}$ ]
$L'_e$	Flux de chaleur latente d'évaporation [ $\text{W.m}^{-2}$ ]
MEND	Mine environnement neutral drainage
$m_{vG}$	Paramètre d'ajustement du modèle empirique [-]
$n$	Durée réelle de l'ensoleillement[T]
$N$	Durée maximale possible de l'ensoleillement ou de la lumière du jour[T]
$n_{vG}$	Paramètre d'ajustement du modèle relié à la courbure de la fonction [-]
$P$	Précipitations [ $\text{LT}^{-1}$ ]
$P_a$	Pression atmosphérique [kPa]
$P_v$	Pression de vapeur au-dessus de la surface d'évaporation [kPa]
PEA	Pression d'entrée d'air
$q_{ext}$	Rayonnement extraterrestre
$q_{O_2}^D$	Flux unitaire diffusif d'oxygène [ $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$ ]

$q_M$	Flux volumétrique associé à la fonte des neiges [ $L^3T^{-1}L^{-2}$ ]
$q_{ns}$	Rayonnement solaire net [ $MJ.m^{-2}.jour^{-1}$ ]
$q_s$	Rayonnement ondes courtes [ $MJ.m^{-2}.jour^{-1}$ ]
$R$	Ruissèlement à la surface [ $LT^{-1}$ ]
$RC$	Remontée capillaire depuis la nappe phréatique [ $LT^{-1}$ ]
RCP	Representative concentration pathways
$R_n$	Bilan énergétique de surface ou énergie radiante nette [ $W.m^{-2}$ ]
$S_r$	Degré de saturation [-]
$T$	Transpiration des végétaux [ $LT^{-1}$ ]
$U_a$	Vitesse du vent [ $LT^{-1}$ ]
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
URSTM	Unité de recherche et de services en technologie minérale
$w_L$	Limite de liquidité [%]
$X_{rcm}$	Variable climatique originale
$X^*$	Variable climatique corrigée
$z$	Profondeur [L]
$\alpha$	Paramètre fonction de la surface du sol [ $LT^{-1}$ ]
$\Gamma$	Pente de la courbe de la pression de vapeur saturante en fonction de la température moyenne de l'air [ $kPa.^{\circ}C^{-1}$ ]
$\gamma_w$	Poids volumique de l'eau [ $MT^{-2}L^{-2}$ ]
$\Delta B$	Assimilation de l'eau par la biomasse des végétaux [ $LT^{-1}$ ]
$\Delta h_{neige}$	Variation dans la hauteur de neige [L]
$\Delta_t$	Incrément de temps [T]
$\Delta\theta_w$	Variation de teneur en eau du milieu [-]
$\delta$	Déclinaison solaire [rad]
$\varepsilon$	Rapport des poids moléculaires de la vapeur d'eau et de l'air sec [-]
$\theta$	Teneur en eau [-]
$\theta_a$	Teneur en air volumique [-]

$\theta_e$	Teneur en eau volumique normalisée ou réduite [-]
$\theta_{eq}$	Teneur en air volumique équivalente [-]
$\theta_w$	Teneur en eau volumique [-]
$\lambda$	Facteur de correction prenant en compte la tortuosité du milieu (modèle de Mualem)
$\mu_w$	Viscosité de l'eau
$v$	Constante psychrométrique [kPa.°C <sup>-1</sup> ]
$\rho_{neige}$	Densité de la neige [ML <sup>-3</sup> ]
$\rho_s$	Masse volumique du sol [ML <sup>-3</sup> ]
$\rho_w$	Densité de l'eau liquide [ML <sup>-3</sup> ]
$\varphi$	Latitude [rad]
$\psi$	Succion [L]
$\psi_a$	Pression d'entrée d'air [L]
$\psi_n$	Paramètre normatif (modèle MK) [L]
$\psi_r$	Succion résiduelle [L]
$\psi_0$	Succion à l'état sec [L]
$\psi_{90}$	Succion matricielle correspondant à un degré de saturation de 90% [L]
$\omega_s$	Angle de l'heure du coucher de soleil
$\nabla h$	Gradient hydraulique multiaxial [L]
%C	Pourcentage de carbone [-]
%S	Pourcentage de soufre [-]
$\langle x \rangle$	Crochets de Macaulay $\langle x \rangle = 0,5 (x +  x )$

## LISTE DES ANNEXES

Annexe A Résultats du suivi des cellules de terrain 2018 - Site Doyon-Westwood .....	153
Annexe B Résultats des essais de mesures de porosité in situ 2015 - Site Doyon-Westwood ...	173
Annexe C Données météorologiques de la station de Rouyn-Noranda Aéroport (24-07-2015 au 19-10-2018).....	175
Annexe D Données météorologiques obtenues par simulations climatiques de la Station de Val-d'Or .....	216

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Au Québec et ailleurs dans le monde, une exploitation responsable des ressources naturelles telles que les métaux précieux ou de base peut être synonyme d'une certaine prospérité socioéconomique. Même si la région où cette exploitation se produit est couverte par des lois et règlements visant à limiter l'impact des opérations sur l'environnement, la production de différents types de rejets miniers peut-être importante et leur gestion environnementale représenter un défi pour tous les acteurs du domaine.

La plupart des sites miniers entreposent leurs rejets de concentrateur (plus communément appelés résidus miniers) dans des infrastructures souvent imposantes appelées parcs à résidus miniers. Ces résidus, produits du processus de minage du minerai, sont confinés par des digues limitant les échanges avec l'environnement extérieur. L'exploitation du minerai engendre également la création de volumes de roches non économiques appelés stériles miniers stockés sous forme d'empilement appelés haldes. La présence de sulfures dans les rejets miniers (résidus miniers et stériles), même à faible concentration, peut entraîner la génération de drainage minier acide (DMA). À la fin de sa vie utile, les infrastructures de stockage des résidus et stériles potentiellement générateurs d'acide doivent donc être restaurés afin de contrôler les contacts avec l'atmosphère et limiter la génération de DMA.

Chaque étape du cycle de vie d'une mine, de l'exploration à la fermeture, peut être sujette à plusieurs risques en lien avec les changements climatiques. Dans le cas des méthodes de restauration, les risques les plus importants sont associés aux variations du régime de précipitation, aux phénomènes météorologiques extrêmes et aux conditions de sécheresse (Stratos, 2011; URSTM, 2017).

La suite de cette introduction présente les caractéristiques de la formation du DMA, les différentes catégories de méthodes de restauration existantes ainsi que les impacts des changements climatiques appréhendées sur ces méthodes.

### 1.1 Caractérisation du drainage minier acide

Le drainage minier acide se produit par oxydation des sulfures par l'eau et l'oxygène (Nicholson, 1994). Les sulfures les plus communément rencontrés sont principalement la pyrite ( $FeS_2$ ), puis la



pyrrhotite ( $Fe_{1-x}S$ ) et la chalcopryrite ( $CuFeS_2$ ) en part moins importante (Nicholson, 1994; Plumlee, 1999).

L'oxydation directe de la pyrite (Nicholson, 1994) produit du fer ferreux  $Fe^{2+}$  et se déroule durant la phase 1 (Figure 1-1).



La formation d'ions  $H^+$  entraîne la diminution du pH et permet les réactions indirectes d'oxydation de la pyrite qui se déroulent durant les phases 1 et 2 (Figure 1-1). Le fer ferreux est oxydé en fer ferrique :



Le pH continue de baisser, mais tant qu'il demeure suffisamment élevé ( $pH > 3 - 3,5$ ), le fer ferrique  $Fe^{3+}$  précipite alors sous forme d'hydroxyde ferrique  $Fe(OH)_3$  (Nicholson, 1994) :



Lorsque la valeur du pH est inférieure à 3 environ (Phase 3 – Figure 1.1), le fer ferrique peut oxyder directement la pyrite sans oxygène (Nordstrom et Southam, 1997) :

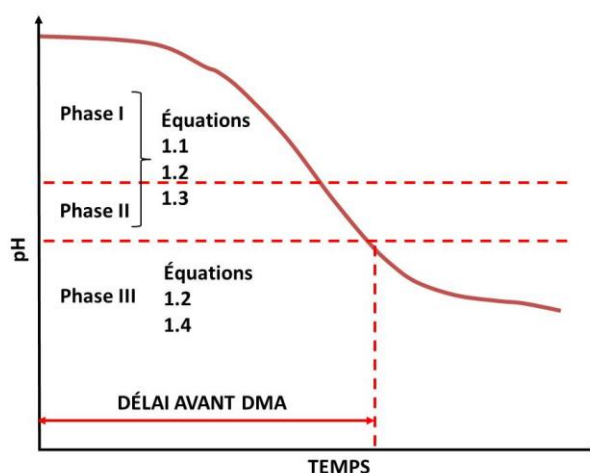


Figure 1.1 : Étapes de la formation du DMA (adapté de Aubertin, Bussière et Bernier, 2002)

L'oxydation de type galvanique peut également se produire lorsque deux types de sulfures différents sont en contact direct (Evangelou et Zhang, 1995; Kwong, 1993; McIntosh et Groat, 1997; Perkins, Nesbitt, Gunter, St-Arnaud et Mycroft, 1995). L'oxydation du sulfure ayant le

potentiel électrochimique le plus bas est accélérée alors que l'autre sulfure, dont le potentiel électrochimique est plus élevé, sera protégé de l'oxydation. Ce phénomène est indépendant de la concentration en oxygène dissous. La pyrite a un potentiel d'oxydoréduction plus élevé que la plupart des autres sulfures et agit généralement comme oxydant sur les autres sulfures.

L'activité bactérienne va aussi avoir un impact sur l'oxydation des sulfures en oxydant le soufre contenu dans les sulfures. Elle catalyse les réactions d'oxydation des sulfures. Par exemple, en phase III de la formation du DMA (Figure 1.1), l'équation 1.2 peut être catalysée par l'activité de bactéries ferro-oxydantes, par un facteur de 1 000 à 1 000 000 (Blowes, Ptacek, Jambor et Weisener, 2003; Nordstrom et Southam, 1997; Singer et Stumm, 1970; Snoeyink et Jenkins, 1980; SRK, 1989).

Les différents types de sulfures ne s'oxydent pas à la même vitesse. La pyrrhotite s'oxyde 20 à 100 fois plus rapidement que la pyrite (Nicholson, 1994). La cinétique des réactions d'oxydation des sulfures peut être influencée par de multiples facteurs comme le pH (Nicholson, 1994), la température (Elberling, 2001), le potentiel rédox (Boon et Heijnen, 2001), la concentration d'oxygène (Blowes et al., 2003), la granulométrie (Nicholson, 1994) et l'agencement des minéraux (Aubertin et al., 2002).

La dissolution de minéraux neutralisants peut contribuer à tamponner le pH (Jambor et Blowes, 1998). Les carbonates, comme la calcite  $CaCO_3$  et la dolomite  $(Ca, Mg)(CO_3)_2$ , présentent un potentiel de neutralisation élevé (Plumlee, 1999). Les oxydes et hydroxydes, les silicates solubles et les phosphates sont également des minéraux neutralisants, mais leur efficacité est moindre (Perkins et al., 1995). La cinétique des réactions de dissolution dépend essentiellement du pH et de la température, ainsi que de la composition minéralogique et de la cristallographie des minéraux en présence (Sherlock, Lawrence et Poulin, 1995).

## 1.2 Contrôle du drainage minier acide

Les méthodes de restauration ont pour objectif d'isoler les rejets miniers de l'eau et l'oxygène, mais peuvent également faire intervenir des procédés en amont pour limiter la quantité de sulfures.

### **1.2.1 Exclusion des sulfures**

La désulfuration des résidus à leur sortie du concentrateur permet de retirer suffisamment de sulfures pour que les résidus ne soient plus générateurs d'acidité (Benzaazoua et al., 2008; Benzaazoua, Bussière, Kongolo, McLaughlin et Marion, 2000; Bussière, Lelièvre, Ouellet et Bois, 1995). Les résidus désulfurés peuvent alors être utilisés comme matériel de recouvrement dans une méthode de restauration (Benzaazoua et al., 1998; Bussière et al., 1997a; Bussière et al., 1997b; Bussière et al., 2002; Bussière et al., 2004; Sjoberg et al., 2001). Le concentré de sulfures peut lui être intégré au remblai en pâte, utilisé pour le remblayage des chantiers souterrains, ou disposé autrement de manière sécuritaire.

### **1.2.2 Exclusion de l'eau**

Il est possible d'utiliser un recouvrement de faible perméabilité composé de matériaux naturels (argiles) ou géosynthétiques (géomembranes ou géocomposites bentonitiques) afin de limiter la percolation de l'eau vers les rejets sulfureux (Aubertin et al., 2002).

En climat aride à semi-aride, les couvertures de type « store and release » permettent l'accumulation d'eau des précipitations et facilitent l'évapotranspiration lors des périodes de sécheresse (Bossé, Bussière, Hakkou, Maqoud et Benzaazoua, 2015; Knidiri et al., 2016). Dans ce type de couverture, l'agencement de matériaux ayant un contraste de propriétés hydriques spécifiques (matériau fin au-dessus d'un matériel plus grossier) permettra la création d'un bris capillaire. L'eau sera alors accumulée dans la couche de rétention d'eau (matériel fin), et relâchée par évaporation lors des périodes sèches.

### **1.2.3 Exclusion de l'oxygène**

En climat tempéré, comme dans le sud du Québec, les méthodes de restauration de type exclusion de l'oxygène sont généralement privilégiées (MEND, 2001; SRK, 1989) : recouvrement en eau (Awoh, Mbonimpa et Bussière, 2013b; Kachhwal, Yanful et Lanteigne, 2011; Vigneault, Kwong et Warren, 2007; Yanful et Catalan, 2002), couverture avec effets de barrière capillaire (CEBC; Aubertin et al., 1995; Bussière, Benzaazoua, Aubertin et Mbonimpa, 2004; Nicholson, Gillham, Cherry et Reardon, 1989) ou une nappe surélevée avec couverture monocouche. L'exclusion de l'oxygène est rendu possible par le fait que le coefficient de diffusion de l'oxygène ( $D_e$ ) dans l'eau

est environ  $10^4$  fois plus faible que dans l'air et la concentration maximale en oxygène dissous dans l'eau est environ 33 fois plus faible que celle de l'atmosphère (Elberling, Nicholson et David, 1993; Fredlund, Rahardjo et Rahardjo, 1993; Hillel, 2004; Renault et Stengel, 1994). Ces principes s'appliquent également pour un matériel proche de la saturation (Collin et Rasmuson, 1988; Gosselin, Mbonimpa, Aubertin et Martin, 2007; Mbonimpa, Aubertin, Aachib et Bussière, 2003). Le recouvrement en eau permet de limiter l'oxydation des minéraux sulfureux contenu dans les résidus sous-jacents et donc la formation de DMA. (Awoh, 2012; MEND, 2001).

Le dépôt subaquatique consiste à déposer les rejets directement sous la surface d'une étendue d'eau naturelle ou artificielle (Awoh, 2012; Awoh, Mbonimpa et Bussière, 2013a; Awoh et al., 2013b). L'ennoiement des résidus consiste à faire remonter le niveau de la nappe à la fin des opérations. La méthode requiert que les résidus soient déposés au préalable dans une structure munie de digues, ayant la capacité de retenir un volume important d'eau, ou dans une fosse. La limitation de cette technique est qu'elle nécessite un suivi à long terme de l'intégrité physique des digues permanentes (Aubertin et al., 2011; Aubertin, Dionne et Marcoux, 1997).

Les couvertures avec effets de barrière capillaire (CEBC) isolent les résidus réactifs par la superposition de plusieurs couches ayant chacune un rôle à jouer sur la performance du système. Ces couvertures sont généralement utilisées lorsque les niveaux phréatiques sont bas (Aubertin et al., 2002; Aubertin et al., 1994; Aubertin, Molson, Bussière et Dagenais, 2006; Bussière, Aubertin et Chapuis, 2003; Bussière, Aubertin et Julien, 2001; Bussière et al., 2006). Le cœur de ce recouvrement multicouche est composé d'une couche de rétention d'eau (matériau fin), surmontée d'une couche drainante (matériau grossier). Le contraste de conductivité hydraulique entre les deux matériaux permet de créer un bris capillaire à l'interface entre les deux couches de matériaux. L'eau est alors retenue dans la couche de rétention d'eau et celle-ci demeure proche de la saturation ( $S_r \geq 85\%$ ) ce qui agit alors comme barrière à l'oxygène. Les couches supérieures dites superficielle et de protection, ont pour objectifs principaux de limiter l'évaporation et de protéger les couches sous-jacentes de l'érosion et de l'intrusion biologique (Aubertin et al., 2002; Aubertin et al., 1999).

La technique de la nappe phréatique surélevée consiste à maintenir les résidus générateurs de contaminants proches de la saturation (Aubertin et al., 2002; Aubertin et al., 1999; Cosset, 2009; Ethier, 2018; Ouangrawa, 2007; Pabst, 2011). Cette technique est associée à un recouvrement monocouche dont la fonction peut varier selon le type de matériau utilisé. Les travaux de recherche

présentés dans ce mémoire concernent cette méthode de restauration; une description plus détaillée est donc présentée au chapitre suivant.

### **1.3 Impact des changements climatiques sur les méthodes de restauration**

L'efficacité de certaines des méthodes de restauration décrites précédemment, comme la CEBC, le recouvrement en eau ou la technique de la nappe phréatique surélevée, sont directement liée au bilan hydrique. Il est donc important de prendre en compte les changements climatiques dans le design des méthodes de restauration afin de limiter les impacts négatifs sur la performance à long terme. Au Québec, les changements climatiques devraient entraîner des variations des températures et des précipitations moyennes annuelles ainsi qu'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes (Desjarlais et Blondlot, 2010; Plummer, Caya, Frigon et Côté, 2006). Une augmentation des températures sera plus marquée en hiver qu'en été. D'ici 2050, les températures moyennes hivernales augmenteront de 2,5 à 3,8°C dans le sud du Québec et de 4,5 à 6,5°C dans le nord. En été, les hausses des températures moyennes se situeront entre 1,9 et 3,0°C au sud et entre 1,6 et 2,8°C au nord (Desjarlais et Blondlot, 2010; Plummer et al., 2006). L'augmentation des précipitations moyennes et extrêmes sera en hiver au nord du 50<sup>e</sup> de l'ordre de 17 à 30%, et moins marqué au sud de 9 à 18 %. En été, l'accroissement des précipitations sera de 3 à 12% au nord, avec peu de changement au sud (Desjarlais et Blondlot, 2010; Monette, 2012). La figure 1.2 compare les moyennes historiques et les changements attendus selon les scénarios de changements climatiques pour les températures et les précipitations en hiver et en été pour la région du Québec.

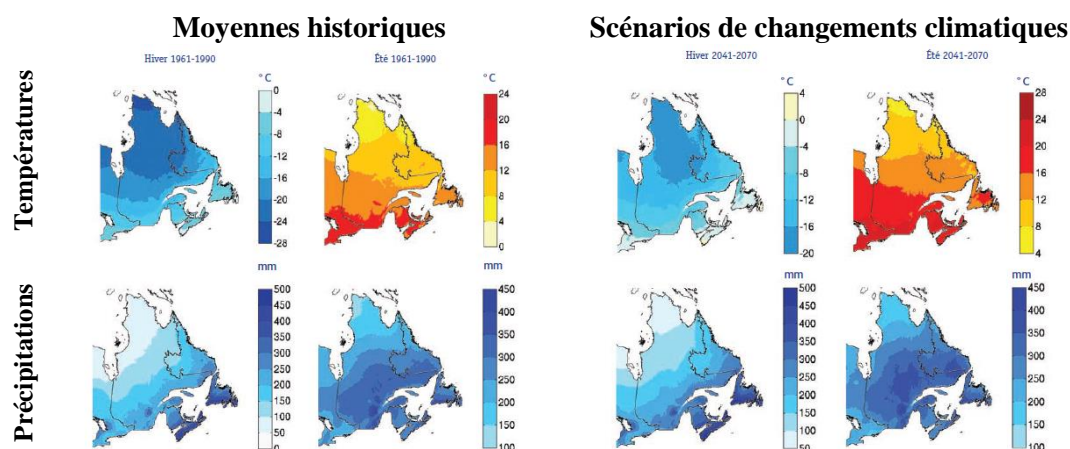


Figure 1.2 : Comparaison entre les moyennes historiques (1961-1990) et les scénarios de changements (2041-2070) des températures et des précipitations hivernales et estivales (tiré de Desjarlais et Blondlot, 2010)

L'augmentation des précipitations pourrait avoir un impact positif sur la méthode de la nappe phréatique surélevée avec recouvrement monocouche. Cependant, l'augmentation de la durée et de l'intensité des périodes de sécheresse pourrait altérer sa performance (URSTM, 2017).

Dans certains secteurs, comme les régions nordiques, où les changements climatiques attendus auront un impact important, des actions sont déjà prises dans le but de limiter les impacts économiques négatifs qui pourraient en découler durant la vie d'une mine (Ford et al., 2009; Ford et al., 2011; Pearce, Ford, Duerden et Marshall, 2010; Pearce et al., 2011; Pittman, Pearce et Ford, 2013; Stratos, 2011). Au sud du 50e parallèle, la prise en compte des changements climatiques en est encore qu'à ses tout débuts. Actuellement, la réglementation au Québec impose par exemple aux compagnies minières qui déposent un plan de restauration d'un site minier de prendre en compte les changements climatiques (MERN, 2017) mais sans balises définies.

## 1.4 Contexte et objectifs du projet de recherche

L'objectif principal de ces travaux de recherche est d'étudier la performance à long terme de la technique de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche dans un contexte de changements climatiques à travers une approche expérimentale et numérique.

Ces travaux s'appliquent au cas du site de la mine Doyon-Westwood (Cadillac, Québec). La restauration des parcs à résidus #2 et #3 de ce site prévoit la mise en place d'un recouvrement monocouche combiné à une remontée de la nappe phréatique (Demers, 2008; Demers, Bussière, Benzaazoua, Mbonimpa et Blier, 2008a; Rey, Demers, Bussière, Mbonimpa et Lortie, 2016, 2017). Trois cellules de terrain expérimentales ont été mise en place sur le site minier pour tester la méthode de restauration (Rey et al., 2016, 2017). Ces cellules de forme pyramidale inversée présentent à la base un mètre de résidus Doyon surmontée d'un recouvrement monocouche constitué de résidus désulfurés. La base des cellules est équipée d'un drain permettant de positionner le niveau de la nappe phréatique et également de recueillir les lixiviats. Un suivi hydrologique et géochimique a été effectué de 2015 à 2018.

Les cellules de terrain et leur suivi ont été utilisés pour réaliser les objectifs spécifiques du projet qui sont :

- Caractérisation en laboratoire des matériaux utilisés pour la construction des cellules;
- Suivi hydrologique et géochimique des cellules à l'été 2018;
- Calibration d'un modèle numérique 1D à partir du suivi effectué sur les cellules #1 et #2 de 2015 à 2018;
- Intégration de l'évolution des conditions climatiques annuelles moyennes prédites jusqu'en 2100 aux modèles numériques des cellules #1 et #2;
- Réalisation d'un modèle numérique 1D représentant l'épaisseur moyenne du parc à résidus #2 de Doyon-Westwood avec les conditions climatiques annuelles moyennes prédites jusqu'en 2100;
- Simulation de l'évolution du niveau de la nappe phréatique au sein du parc à résidus #2 afin de statuer de l'influence des changements climatiques sur la performance de la méthode de restauration sur le long terme.

Ces travaux de recherche s'inscrivent dans un projet global financé par le FRQNT, ayant pour objectif le développement d'une approche méthodologique visant à intégrer les changements climatiques à la conception des ouvrages de rétention des résidus miniers et de restauration. Afin de développer cette approche, trois objectifs ont été définis soit l'identification des conditions météorologiques extrêmes, l'étude de l'influence des changements climatiques sur l'évolution de

la performance de méthodes de restauration et sur l'intégrité des ouvrages de rétention et la gestion des eaux. Les résultats des présents travaux de maîtrise, qui s'inscrivent dans le second objectif, feront partie de cette approche méthodologique.

## **1.5 Contenu du mémoire**

À la suite de ce premier chapitre d'introduction, les connaissances théoriques et les applications pratiques de la méthode de restauration du recouvrement monocouche combiné à la nappe phréatique surélevée sont présentés au chapitre 2. Ce chapitre s'attarde également aux concepts de modélisation climatique et présente également les résultats d'une étude présentant les changements climatiques attendus pour la région de l'Abitibi. Enfin, le logiciel de simulation numérique SEEP/W (Geo-Slope International Ltd., 2017) utilisé dans le cadre de ces travaux est présenté.

Au chapitre 3, le site minier à l'étude, les cellules de terrains ainsi que les résultats de la caractérisation en laboratoire des matériaux étudiés sont présentés. Les données climatiques actuelles et futures utilisées pour les simulations numériques sont par la suite présentées dans ce chapitre.

Un article de conférence présenté lors de 71<sup>e</sup> Conférence canadienne de géotechnique à Edmonton en 2018 est présenté au chapitre 4. Cet article présente des résultats préliminaires sur les modèles numériques des cellules de terrain, réalisés en considérant des changements climatiques simplifiés.

Les résultats des modélisations numériques et l'analyse du comportement hydrogéologique de la méthode de restauration en incluant les projections climatiques jusqu'en 2100 est présenté au chapitre 5 sous forme d'un article scientifique qui a été soumis pour publication au Canadian Geotechnical Journal en 2019.

Le chapitre 6 porte sur une analyse de sensibilité de certains paramètres du modèle numérique. Finalement, les limites de l'étude ainsi que les recommandations pour la suite du projet sont présentées en conclusion au chapitre 7.



## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTERATURE

La technique de restauration de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche permet de limiter la migration de l'oxygène vers des résidus sulfureux et ainsi la génération de DMA. Cette méthode de restauration est la combinaison de deux concepts, celui de la nappe phréatique surélevée et celui du recouvrement monocouche. Ce chapitre présente dans un premier temps, les principes de circulation de l'eau et de l'oxygène dans un milieu poreux ainsi que les notions de bilan hydrique.

La technique de mise en place de la méthode de restauration étudiée ainsi que les facteurs qui peuvent influencer son efficacité, au travers des différents travaux de recherche portant sur le sujet sont présentés par la suite.

L'efficacité de cette méthode de restauration pourrait être influencée par les changements climatiques. La seconde partie de ce chapitre présentera donc les concepts entourant les modèles climatiques et les données de changements climatiques attendus pour la région à l'étude.

Afin de statuer de la performance de cette méthode de restauration, des simulations numériques ont été effectuées dans cette étude. Pour terminer ce chapitre, le code numérique utilisé pour ces simulations est présenté.

### 2.1 Principes de la circulation de l'eau dans un milieu poreux

#### 2.1.1 Écoulements en milieu saturé

L'écoulement de l'eau dans un milieu poreux saturé est défini par la loi de Darcy (1856). Cette loi est valide pour un fluide incompressible dont l'écoulement est laminaire et isotherme dans un milieu saturé en eau, uniforme et incompressible. Elle s'exprime dans un milieu en une dimension selon l'équation suivante (Delleur, 2010; Fredlund, Rahardjo et Fredlund, 2012; Hillel, 2004) :

$$q = -k_{sat} i \quad (2.1)$$

<i>Paramètre</i>	<i>Définition</i>
$q$	Débit spécifique ou la vitesse de Darcy [ $LT^{-1}$ ]
$k_{sat}$	Conductivité hydraulique saturée [ $LT^{-1}$ ]
$i = \frac{\delta h}{\delta l}$	Gradient hydraulique [-]

### 2.1.2 Écoulements en milieu non saturé

Dans un milieu poreux non saturé, comme c'est le cas au-dessus du niveau de la nappe phréatique, la présence d'air modifie l'écoulement de l'eau. L'équation de Darcy a été adaptée par Richards (1931), pour les écoulements en milieu non saturé et s'exprime de la manière suivante :

$$q = -k(\psi)\nabla h \quad (2.2)$$

<i>Paramètre</i>	<i>Définition</i>
$k$	Conductivité hydraulique non saturée [ $LT^{-1}$ ]
$\psi$	Succion [L]
$\nabla h$	Gradient hydraulique multiaxial [L]

Pour décrire l'écoulement de l'eau en régime transitoire dans un milieu partiellement saturé, l'équation 2.2 est combinée à l'équation de continuité. L'équation de continuité s'explique comme suit. On considère un cube de sol de volume unitaire, comme illustré à la figure 2.1, traversé par un flux hydraulique selon l'axe des x.

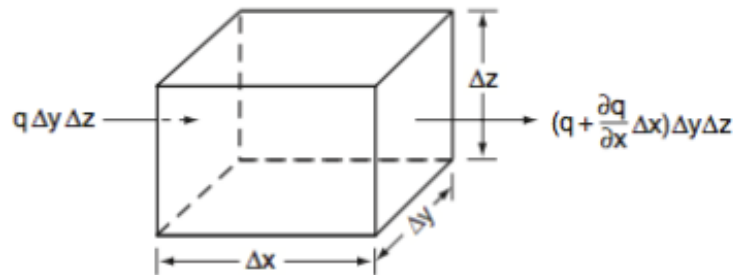


Figure 2.1 : Volume unitaire de sol et bilan de débits illustrant le principe de continuité (adapté de Hillel, 2004)

La différence entre le débit entrant et le débit sortant de ce volume unitaire est définie telle que :

$$\Delta q = -\left(\frac{\delta q}{\delta x} \Delta x \Delta y \Delta z\right) \quad (2.3)$$

La différence de débit s'explique par une accumulation d'eau à l'intérieur du volume élémentaire et peut donc aussi s'exprimer en terme de variation de teneur en eau en fonction du temps :

$$\Delta q = \left(\frac{\delta \theta}{\delta t} \Delta x \Delta y \Delta z\right) \quad (2.4)$$

<i>Paramètre</i>	<i>Définition</i>
$\theta$	Teneur en eau volumique [-]

En égalisant les deux équations précédentes, on obtient :

$$-\left(\frac{\delta q}{\delta x} \Delta x \Delta y \Delta z\right) = \left(\frac{\delta \theta}{\delta t} \Delta x \Delta y \Delta z\right) \quad (2.5)$$

$$-\frac{\delta q}{\delta x} = \frac{\delta \theta}{\delta t} \quad (2.6)$$

En exprimant l'équation 2.6 en trois dimensions, on obtient l'équation de continuité (Hillel, 2004) :

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = -\left(\frac{\delta q_x}{\delta x} + \frac{\delta q_y}{\delta y} + \frac{\delta q_z}{\delta z}\right) \quad (2.7)$$

L'équation de Richards (1931), décrivant l'écoulement en milieu non saturé, est donc obtenue en combinant l'équation 2.2 et l'équation 2.7. Sachant que la charge hydraulique  $h = z + \psi$  et que  $\Delta z$  est nul pour un écoulement horizontal et égal à 1 pour un écoulement vertical on obtient :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial k}{\partial z} \quad (2.8)$$

Cette équation est valide pour tous types de sols indépendamment de son isotropie et de sa composition homogène ou hétérogène.

## 2.2 Caractéristiques hydriques des matériaux

Les équations précédemment présentées montrent que l'écoulement de l'eau dans un milieu saturé ou non saturé va dépendre de la teneur en eau volumique et de la conductivité hydraulique. La courbe de rétention d'eau (CRE) est la fonction permettant de décrire l'évolution de la teneur en eau volumique en fonction de la succion. La fonction de perméabilité (ou fonction de conductivité) représente la conductivité hydraulique en fonction de la succion. La figure 2.2 illustre ces deux courbes ( $\theta$ - $\psi$  et  $k$ - $\psi$ ) dans les cas d'un silt et d'un sable.

La conductivité hydraulique et la teneur en eau volumique d'un matériau vont diminuer au fur et à mesure de l'augmentation de la succion exercée sur celui-ci, en raison de l'entrée de l'air dans le matériau qui va ainsi ralentir l'écoulement de l'eau.

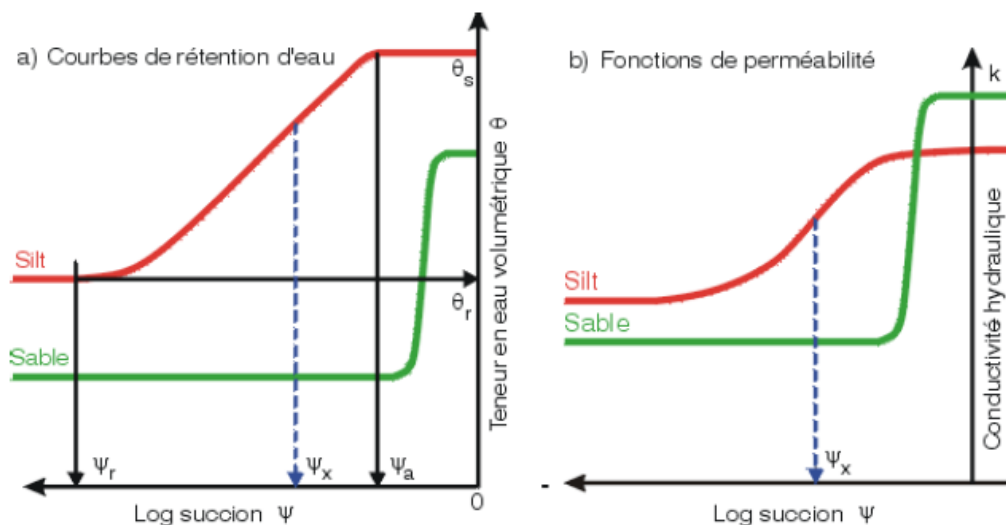


Figure 2.2 : Courbes de rétention d'eau théoriques a) et fonctions de perméabilité b) théoriques d'un sable et d'un silt (Aubertin et al., 2002)

### 2.2.1 Courbe de rétention en eau

La courbe de rétention en eau permet de définir plusieurs paramètres d'intérêt d'un matériau. La pression d'entrée d'air  $\psi_a$  (PEA ou AEV en anglais) correspond à la valeur de la succion à laquelle le matériau commence à se désaturer. La teneur en eau volumique du matériau est à son maximum (teneur en eau saturée  $\theta_s$ ) jusqu'à ce que la succion atteigne la valeur de  $\psi_a$ . La teneur en eau volumique diminue alors en fonction de l'augmentation de la succion, jusqu'à atteindre une valeur minimale correspondant à la succion résiduelle  $\psi_r$ . Au-delà de ce point, le matériau a atteint sa teneur en eau volumique minimale (teneur en eau volumique résiduelle  $\theta_r$ ). Ces différents points caractéristiques sont présentés à la figure 2.2 a).

La courbe de rétention en eau peut être obtenue grâce à des essais effectués en laboratoire ou directement sur le terrain. Pour les essais en laboratoire, mentionnons ici en particulier, la cellule Tempe (ASTM D3152-72, ASTM D6836-02; Aubertin et al., 1999; Aubertin, Ricard et Chapuis, 1998) et la plaque de pression (Albright et al., 2006; Aubertin et al., 1995; Aubertin et al., 1998; Benson, Sawangsuriya, Trzebiatowski et Albright, 2007; Hillel, 2004; Ricard, 1995). Les essais se réalisent en mouillage ou en drainage, c'est-à-dire que le matériel étudié est soit progressivement saturé ou désaturé. Les essais sont généralement effectués en drainage pour leur plus grande facilité d'exécution. Les courbes obtenues en drainage et en mouillage ne sont cependant pas identiques à

cause des effets d'hystérésis. Les effets d'hystérésis s'expliquent par différents facteurs comme : la géométrie non uniforme des gros pores et leur connexion avec des pores plus petits; l'angle de contact entre l'eau et le matériau; l'air emprisonné dans les pores; le tassement au sein du matériau; et la condensation capillaire (Delage et Cui, 2000; Hillel, 2004; Maqsoud, Bussière, Aubertin et Mbonimpa, 2006).

### 2.2.1.1 Modèles descriptifs

Les résultats d'essais en laboratoire ne permettant pas d'obtenir une courbe de rétention d'eau lisse et complète, des modèles descriptifs sont alors utilisés pour l'obtenir. Différents modèles sont utilisés comme ceux de Fredlund et Xing (1994), de Brooks et Corey (1964), de Gardner (1958). Mentionnons ici, le modèle de van Genuchten (1980), très souvent utilisé :

$$\theta_e = \left[ \frac{1}{1 + (a_{vG}\psi)^{n_{vG}}} \right]^{m_{vG}} \quad (2.9)$$

<i>Paramètre</i>	<i>Définition</i>
$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	Teneur en eau équivalente [-]
$a_{vG}$	Paramètre d'ajustement du modèle relié à $\psi_a$ [L <sup>-1</sup> ]
$n_{vG}$	Paramètre d'ajustement du modèle relié à la courbure de la fonction [-]
$m_{vG}$	Paramètre d'ajustement du modèle empirique [-]

Le paramètre  $m_{vG}$  peut être défini selon Mualem (1976) par  $m_{vG} = (n_{vG} - 1)/n_{vG}$  ou selon Burdine (1953) par  $m_{vG} = (n_{vG} - 2)/n_{vG}$ .

### 2.2.1.2 Modèles prédictifs

À partir des caractéristiques géotechniques d'un matériau, il est possible de prédire la courbe de rétention en eau. Plusieurs modèles basés sur des données expérimentales ou sur les propriétés des matériaux existent, comme les modèles de Kovacs (1981), de Arya (Arya, Leij, van Genuchten et Shouse, 1999; Arya et Paris, 1981), de Haverkamp (Haverkamp, Debionne, Angulo-Jaramillo et de Condappa, 2016; Haverkamp et Parlange, 1986) et de Tyler et Wheatcraft (1990).

Le modèle de Kovacs (1981), permettant de lier le degré de saturation ( $S_r$ ) à la succion, a été modifié afin de remplacer certains paramètres difficiles à obtenir par des paramètres hydrogéotechniques de base pouvant être mesurés en laboratoire ou calculés directement (Aubertin

et al., 2003a; Aubertin et al., 1998). L'équation définissant le modèle de Kovacs modifié (MK; Aubertin, Mbonimpa, Bussière et Chapuis, 2003a) est la suivante :

$$S_r = S_c + S_a^*(1 - S_c) = \frac{\theta}{\theta_s} \quad (2.10)$$

La composante  $S_c$  est liée aux forces capillaires et s'exprime :

$$S_c = 1 - \left[ \left( \frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 + 1 \right]^m e^{-m \left( \frac{h_{co}}{\psi} \right)^2} \quad (2.11)$$

<i><b>Paramètre</b></i>	<i><b>Définition</b></i>
$h_{co}$	Remontée capillaire équivalente [L]

La remontée capillaire équivalente  $h_{co}$  se calcule de manière différente pour un matériau granulaire ou fin. Pour un matériau fin, l'équation est la suivante :

$$h_{co} = \frac{0.15\rho_s}{e} w_L^{1.45} \quad (2.12)$$

<i><b>Paramètre</b></i>	<i><b>Définition</b></i>
$\rho_s$	Masse volumique du sol [ML <sup>-3</sup> ]
$e$	Indice des vides [L <sup>-1</sup> ]
$w_L$	Limite de liquidité [%]

Pour un matériau granulaire :

$$h_{co} = \frac{0.75}{e D_{10} (1.17 \log C_U + 1)} \quad (2.13)$$

<i><b>Paramètre</b></i>	<i><b>Définition</b></i>
$D_{10}$	Diamètre des grains correspondant à 10% de passant [L]
$C_U$	Coefficient d'uniformité [-]

Le paramètre  $m$  est lié aux propriétés géotechniques du matériau et est égal à  $3 \times 10^{-5}$  pour un matériau fin et égal à  $m = 1/C_u$  pour un matériau granulaire.

Le paramètre  $S_a$  est une composante liée aux forces d'adhésion et se calcule de la façon suivante :

$$S_a = a_c C_\psi \frac{(h_{co}/\psi)^{2/3}}{e^{1/3}(\psi/\psi_n)^{1/6}} \quad (2.14)$$

<b>Paramètre</b>	<b>Définition</b>
$a_c$	Paramètre lié aux propriétés géotechniques [-] (pour un matériau fin $a_c = 7 \times 10^{-4}$ et pour un matériau granulaire $a_c = 0,01$ )
$C_\psi$	Paramètre d'ajustement [-]
$\psi_n$	Paramètre assurant la cohérence des unités [L] ( $\psi_n = 1$ cm quand $\psi$ en cm)

Lorsque la succion atteint une certaine limite imposée par les propriétés d'équilibre thermodynamique, le paramètre  $C_\psi$  permet de maintenir une teneur en eau volumique nulle (Fredlund et Xing, 1994). Il est défini par :

$$C_\psi = 1 - \frac{\ln(1+\psi/\psi_r)}{\ln(1+\psi_0/\psi_r)} \quad (2.15)$$

<b>Paramètre</b>	<b>Définition</b>
$\psi_r = 0,86h_{co}^{1,2}$	Succion résiduelle [L]
$\psi_0 = 10^7$	Succion à l'état sec [L]

Enfin, le paramètre  $S_a^*$  se calcule :

$$S_a^* = 1 - \langle 1 - S_a \rangle \quad (2.16)$$

ou :  $\langle 1 - S_a \rangle = 0,5(1 - S_a + |1 - S_a|)$

## 2.2.2 Conductivité hydraulique saturée

La valeur maximale de  $k$  sur la fonction de perméabilité est appelée conductivité hydraulique saturée  $k_{sat}$ ; le matériau est alors entièrement saturé. La conductivité hydraulique saturée, qui peut être mesurée en laboratoire (perméamètres), peut aussi être estimée à partir de différents modèles (Carman, 1956; Chapuis et Aubertin, 2003; Hazen, 1911; Kozeny, 1953; Taylor, 1948). Ces modèles se basent sur les propriétés géotechniques des matériaux (Chapuis et Aubertin, 2003; Freeze et Cherry, 1979). Parmi ces modèles, le modèle Kozeny-Carman modifié (KCM ; Mbonimpa, Aubertin, Chapuis et Bussière, 2002), utilisé dans le cadre de ces travaux, est détaillé ici. Ce modèle présente deux équations différentes selon le type de matériaux (Mbonimpa et al., 2002). Pour les matériaux fins (plastiques et cohésifs), l'équation est la suivante :

$$k_{sat} = C_p \frac{\gamma_w}{\mu_w} \frac{e^{7,7w_L^{-0,15}}}{1+e} \frac{1}{\rho_s^2 w_L^3} \quad (2.17)$$

<i>Paramètre</i>	<i>Définition</i>
$C_p \approx 5,6 \text{ g}^2/\text{m}^4$	Constante [ $\text{M}^2\text{L}^{-4}$ ]
$\gamma_w$	Poids volumique de l'eau [ $\text{MT}^{-2}\text{L}^{-2}$ ]
$\mu_w$	Viscosité de l'eau

Pour les sols granulaires, l'équation est :

$$k_{sat} = C_G \frac{\gamma_w}{\mu_w} \frac{e^5}{1+e} C_u^{1/3} D_{10}^2 \quad (2.18)$$

<i>Paramètre</i>	<i>Définition</i>
$C_G = 0,1$	Constante

### 2.2.3 Fonction de perméabilité et conductivité hydraulique non saturée

Plusieurs méthodes expérimentales existent pour mesurer la conductivité hydraulique non saturée en laboratoire, mais elles sont difficiles à mettre en place (Fredlund et al., 2012; Hillel, 2004) . Les modèles prédictifs sont par conséquent généralement utilisés.

La conductivité hydraulique non saturée peut être calculée selon l'équation suivante (Fredlund et al., 2012; Mbonimpa, Aubertin et Bussière, 2006; Mualem, 1976) :

$$k = k_r k_{sat} \quad (2.19)$$

<i>Paramètre</i>	<i>Définition</i>
$k_r$	Conductivité hydraulique relative [-]

Ils existent plusieurs modèles prédictifs dont des modèles statistiques (Brooks et Corey, 1964; Burdine, 1953; Campbell, 1974; Fredlund et Xing, 1994; Gardner, 1958; Poulsen, Moldrup et Jacobsen, 1998). Dans la plupart de ces modèles,  $k_r$  peut être obtenue à partir de la courbe de rétention d'eau (Burdine, 1953; Childs et Collis-George, 1950; Fredlund et Xing, 1994; Mbonimpa et al., 2006; Mualem, 1976). Le modèle le plus utilisé est le modèle de Mualem (1976), à partir duquel van Genuchten (1980) a proposé l'équation suivante :



$$k_r = k_{sat} \theta_e^\lambda \left[ 1 - \left( 1 - \theta_e^{\frac{1}{m_{vg}}} \right)^{m_{vg}} \right]^2 \quad (2.20)$$

<i>Paramètre</i>	<i>Définition</i>
$\theta_e$	Teneur en eau volumique normalisée ou réduite [-]
$\lambda$	Facteur de correction prenant en compte la tortuosité du milieu (= 0,5 généralement)

Comme pour les courbes de rétention en eau, il est possible d'observer des phénomènes d'hystérésis, mais également des effets de compressibilité (Bossé, Bussière, Maqsoud, Hakkou et Benzaazoua, 2016; Maqsoud, Bussière, Aubertin et Mbonimpa, 2012; Mualem, 1976). Pour prendre en compte le phénomène d'hystérésis, deux fonctions de perméabilité doivent être estimées en fonction des courbes de rétention d'eau en mouillage et en drainage respectivement. On considère habituellement ces phénomènes comme peu présents dans le cas des sols peu compressibles.

## 2.3 Mécanisme de diffusion de l'oxygène dans un milieu poreux

L'oxygène se déplace dans un milieu poreux selon trois modes de circulation, soit la diffusion, l'advection et la convection (Fredlund et al., 2012). L'advection et la diffusion sont souvent les deux principaux mécanismes et la prédominance de l'un par rapport à l'autre va dépendre du type de matériau poreux traversé. Pour des matériaux plus grossiers comme des stériles, l'advection domine (Amos et al., 2015; Bennet, Harries et Ritchie, 1989; Lefèbvre, 1994; Morin, Gerencher, Jones et Konasewich, 1991). Dans le cas des matériaux fins comme les résidus ou certains cas de recouvrement où des résidus désulfurés sont utilisés par exemple, la diffusion sera le mécanisme prédominant (Aachib, Mbonimpa et Aubertin, 2004; Collin et Rasmuson, 1988; Demers, 2008; Kim et Benson, 2004; Mbonimpa et Aubertin, 2002). Dans le cadre de ces travaux, il ne sera fait mention que du mécanisme de diffusion, les autres modes de circulation étant négligeable dans le cas des résidus.

La diffusion de l'oxygène est un phénomène de transport moléculaire. L'oxygène se déplace au travers de l'eau ou de l'air présent dans le milieu poreux ; le mouvement des molécules se développe alors sous l'effet d'un gradient de concentration de la région de forte concentration vers la région de faible concentration.

La première loi de Fick (équation 2.21) met en relation le flux diffusif d'oxygène qui traverse un milieu poreux et le gradient de concentration à une position et un temps définis (Aachib et al., 2004; Bear, 1972; Crank, 1979; Hillel, 2004; Mbonimpa et al., 2003) :

$$q_{O_2}^D(z, t) = -D_e \frac{\partial C_{O_2}(z, t)}{\partial z} \quad (2.21)$$

<b>Paramètre</b>	<b>Définition</b>
$q_{O_2}^D$	Flux unitaire diffusif d'oxygène [ML <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup> ]
$D_e$	Coefficient de diffusion de l'oxygène [L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup> ]
$C_{O_2}$	Concentration en oxygène [ML <sup>-3</sup> ]
$z$	Profondeur [L]

Afin de prendre en compte la variation de la concentration d'oxygène en fonction du temps et de la profondeur, on utilise la seconde loi de Fick. Elle permet de déterminer la concentration en oxygène en un point donné. Pour un milieu non réactif, l'équation est la suivante (Aachib et al., 2004) :

$$\frac{\delta}{\delta t}(\theta_{eq} C_{O_2}) = \frac{\delta}{\delta z} \left( D_e \frac{\delta C_{O_2}}{\delta z} \right) \quad (2.22)$$

<b>Paramètre</b>	<b>Définition</b>
$\theta_{eq}$	Teneur en air volumique équivalente [-]

La teneur en air volumique équivalente est utilisée afin de prendre en compte la diffusion de l'oxygène dans l'air et dans l'eau et se calcule de la manière suivante (Aachib et al., 2004) :

$$\theta_{eq} = \theta_a + H\theta_w \quad (2.24)$$

<b>Paramètre</b>	<b>Définition</b>
$\theta_a$	Teneur en air volumique [-]
$\theta_w$	Teneur en eau volumique [-]
$H$	Constante de Henry (= 0,03 à 20°C) [-]

Pour un milieu réactif, où il y a consommation d'oxygène par le milieu (par exemple résidus sulfureux), le taux de consommation d'oxygène doit alors être pris en compte (Mbonimpa et al., 2003) :

$$\frac{\delta C_{O_2}}{\delta t} = D^* \frac{\delta^2 C_{O_2}}{\delta z^2} - K_r^* C_{O_2} \quad (2.23)$$

<b>Paramètre</b>	<b>Définition</b>
$D^* = D_e / \theta_{eq}$	Coefficient de diffusion apparent [ $L^2 T^{-1}$ ]
$K_r^* = K_r / \theta_{eq}$	Coefficient du taux de réaction apparent [ $T^{-1}$ ]

## 2.4 Bilan hydrique

La teneur en eau d'un sol varie en fonction des entrées et des sorties d'eau du milieu. Un bilan hydrique du milieu peut alors être dressé en calculant la différence entre les entrées et les sorties (Hillel, 2004) :

$$\Delta\theta_w + \Delta B = \overbrace{(P + RC)}^{\text{Entrées}} - \underbrace{(D + E + T + R)}_{\text{Sorties}} \quad (2.25)$$

<b>Paramètre</b>	<b>Définition</b>
$\Delta\theta_w$	Variation de teneur en eau du milieu [-]
$\Delta B$	Assimilation de l'eau par la biomasse des végétaux [ $LT^{-1}$ ]
$P$	Précipitations [ $LT^{-1}$ ]
$RC$	Remontée capillaire depuis la nappe phréatique [ $LT^{-1}$ ]
$D$	Drainage vers la nappe phréatique [ $LT^{-1}$ ]
$E$	Évaporation [ $LT^{-1}$ ]
$T$	Transpiration des végétaux [ $LT^{-1}$ ]
$R$	Ruissèlement à la surface [ $LT^{-1}$ ]

Certaines composantes du bilan hydrique d'intérêt dans le cadre de ces travaux de recherche sont détaillées ci-après.

### 2.4.1 Évaporation

Le mécanisme de l'évaporation consiste au transfert de l'eau du sol vers l'atmosphère. Lorsque le sol est complètement saturé et que l'eau peut s'évaporer sans restriction, on parle d'évaporation potentielle, alors que dans le cas d'un sol non saturé, il est question d'évaporation réelle.

Difficiles à mesurer et modéliser (Cui et Zornberg, 2008), les modèles employés pour estimer l'évaporation consistent à réaliser un bilan énergétique du milieu. Plusieurs modèles existent tels

que Penman (1940), Priestley-Taylor (1972), Makkink (1957), Turc (1961), Mahrt et Ek (1984). Le modèle de Penman, modifié par Wilson (Wilson, Fredlund et Barbour, 1994), est l'un des modèles que l'on retrouve dans le logiciel SEEP/W et utilisé dans la suite de ces travaux (Geo-Slope International Ltd., 2017) :

$$E = \frac{\Gamma R_n + v E_a}{\Gamma + A_v} \quad (2.26)$$

<b>Paramètre</b>	<b>Définition</b>
$E$	Évaporation [ $\text{LT}^{-1}$ ]
$\Gamma$	Pente de la courbe de la pression de vapeur saturante en fonction de la température moyenne de l'air [ $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ]
$R_n$	Bilan énergétique de surface ou énergie radiante nette [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$v$	Constante psychrométrique [ $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ]
$E_a$	Flux effectif d'énergie provenant du vent [ $\text{LT}^{-1}$ ]
$A$	Inverse de l'humidité relative à la surface du sol [-]

La constante psychrométrique est définie par l'équation suivante (Allen, Pereira, Raes et Smith, 1998) :

$$v = \frac{c_p P}{\varepsilon L_e} = 6,65 \cdot 10^{-4} \cdot P_a \quad (2.27)$$

<b>Paramètre</b>	<b>Définition</b>
$C_p$	Chaleur spécifique (= 1,013 $\text{kJ} \cdot \text{kg} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ pour des conditions normales pour l'air sec)
$\varepsilon$	Rapport des poids moléculaires de la vapeur d'eau et de l'air sec (= 0,622) [-]
$L_e$	Chaleur latente de vaporisation (= 2,45 $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
$P_a$	Pression atmosphérique [ $\text{kPa}$ ]

Le bilan énergétique de surface  $R_n$  est déterminé par la quantité d'énergie, absorbée, dégagée et emmagasinée par une surface. Ici, elle sera caractérisée par l'influence des radiations solaires sur le réchauffement de la couche de matériaux sub-surfaces et de la couche d'air au-dessus du sol, ainsi que sur le flux d'évaporation (Blight, 2002). On peut le calculer à l'aide de l'équation suivante (Blight, 2002; Wilson et al., 1994) :

$$R_n = G + H + L'_e \quad (2.28)$$

<b>Paramètre</b>	<b>Définition</b>
$R_n$	Bilan énergétique de surface [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$G$	Flux de chaleur du sol (fine couche sous la surface) [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

$H$	Flux de chaleur sensible (couche d'air au-dessus du sol) [ $\text{W.m}^{-2}$ ]
$L'_e$	Flux de chaleur latente d'évaporation [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

Les valeurs de  $G$  et  $H$  sont généralement négligeables par rapport à  $L'_e$  (Blight, 2002).

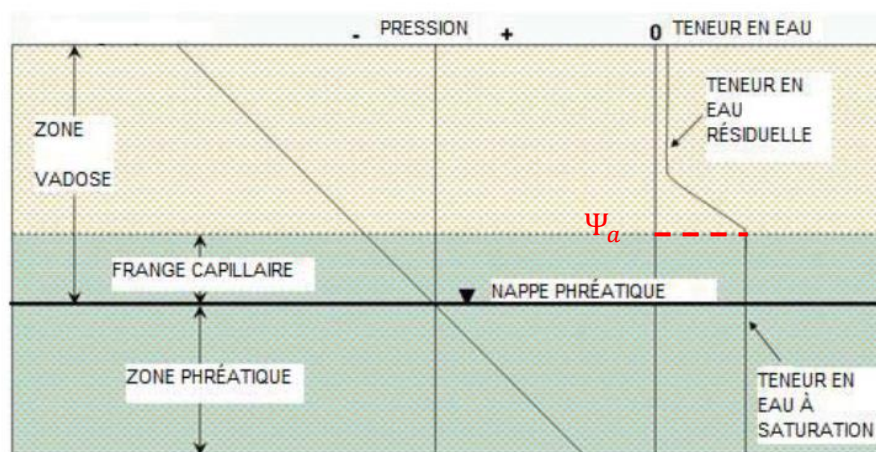
La part de l'évaporation dû à l'effet du vent est estimé grâce à la formule suivante (Allen et al., 1998) :

$$E_a = 0,35(\alpha + 0.15U_a)P_v(B - A) \quad (2.29)$$

Paramètre	Définition
$\alpha$	Paramètre fonction de la surface du sol [ $\text{LT}^{-1}$ ]
$U_a$	Vitesse du vent [ $\text{LT}^{-1}$ ]
$P_v$	Pression de vapeur au-dessus de la surface d'évaporation [kPa]
$B$	Inverse de l'humidité relative de l'air [-]

## 2.4.2 Remontée capillaire

Dans un profil de sol comme illustré à la figure 2.3, une épaisseur située au-dessus du niveau de la nappe phréatique (frange capillaire) demeure saturée par le phénomène de remontée capillaire. La hauteur de la frange capillaire dépend des propriétés hydriques et physiques d'un matériel. Plus le matériel est fin, plus la frange capillaire sera importante. La remontée capillaire au sein d'un matériau va dépendre de sa granulométrie et de son indice des vides. Au sein de la frange capillaire, la teneur en eau reste proche de sa valeur maximale, même si l'on se situe au-dessus de la nappe phréatique. La pression devient par contre négative, on parle alors en terme de succion. La représentation schématique de la courbe de rétention d'eau, illustrée à la figure 2.3, montre que la hauteur maximale de la frange capillaire correspond approximativement à la PEA.



Adaptée de Senes (1996)

Figure 2.3 : Nomenclature, profils de teneur en eau et de pression au-dessus et en dessous d'une nappe phréatique (adapté de Cosset, 2009)

## 2.5 Technique de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche

### 2.5.1 Concept théorique

Le concept de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche (figure 2.4) consiste à maintenir le niveau de la nappe phréatique au sein d'un parc à résidus, à une profondeur permettant de maintenir les résidus saturés ou proche de la saturation. L'établissement de la nappe à une telle profondeur est en premier lieu contrôlé par la configuration du parc à résidus, constitué de fondations peu perméables et de digues. Cette profondeur doit être inférieure à la valeur de la PEA afin de maintenir les résidus situés au-dessus de la nappe phréatique saturés (Aubertin et al., 1999; Senes, 1996).

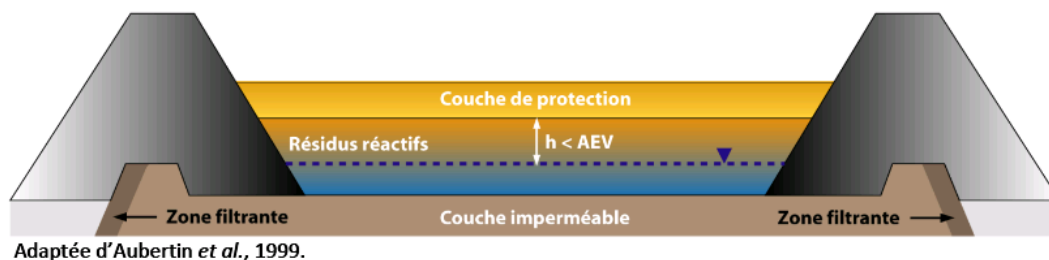


Figure 2.4 : Méthode de restauration de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche (URSTM, 2017)

Lorsque les résidus sont saturés ou proche de la saturation la migration de l'oxygène est alors limitée. Le flux d'oxygène est proportionnel au coefficient de diffusion effectif de l'oxygène ( $D_e$  ; cf. section 2.3). Comme illustré à la figure 2.5,  $D_e$  diminue avec l'augmentation du degré de saturation ( $S_r$ ) selon les différents modèles utilisés. Lorsque  $S_r$  atteint une valeur supérieure à 0.85, la valeur de  $D_e$  se rapproche de celle du coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau ( $D_w^0$ ).

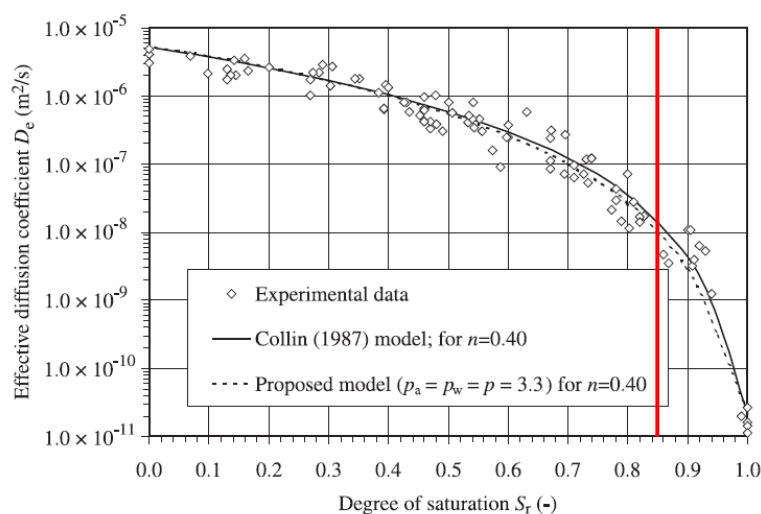


Figure 2.5 : Comparaison entre le coefficient de diffusion de l'oxygène  $D_e$  mesuré pour différent matériel en fonction du degré de saturation  $S_r$  et le modèle de Colin (1987)

La granulométrie d'un résidu minier s'apparente à celle d'un silt, avec de 70 à 80% de particules passant 80  $\mu\text{m}$  (Aubertin et al., 2002). La valeur élevée de la PEA (entre 20 et 40 kPa; Bussière et al., 2007) des résidus permettra de maintenir une grande partie des résidus située au-dessus de la nappe phréatique saturée et ainsi limiter la migration de l'oxygène, l'oxydation des minéraux sulfureux et donc la génération de DMA.

## **2.5.2 Mise en place de la nappe phréatique surélevée**

Trois différentes techniques permettent généralement de contrôler le niveau de la nappe phréatique soit la modification du bilan hydrique, l'amélioration de la capacité de rétention en eau des résidus par épaissement et une stratégie couplant à la fois la modification du bilan hydrique et la construction de digues limitant l'écoulement de l'eau souterraine (Day, Higgs et Paine, 1996; Orava, Tremblay, Tibble et Nicholson, 1997; Senes, 1996).

### **2.5.2.1 Modification du bilan hydrique dans le parc à résidus**

Le niveau de la nappe phréatique peut-être maintenu à un niveau élevé, en modifiant le bilan hydrique du parc à résidus pour que celui-ci demeure positif, c'est-à-dire que les entrées soient supérieures aux pertes (Senes, 1996). L'infiltration de surface (due aux précipitations) et l'écoulement de l'eau souterraine doivent être dirigés vers l'intérieur du parc, alors que l'évaporation à la surface des résidus et les suintements au niveau des digues doivent être limités. Dans un contexte de changements climatiques, la variation du régime de précipitations doit être prise en compte. Le granuloclassement des résidus lors de leur dépôt et leur conductivité hydraulique vont également avoir une influence sur le niveau maximal que pourra atteindre la nappe phréatique. Différentes techniques sont envisageables pour modifier le bilan hydrique (Ouangrawa, 2007; Senes, 1996) :

- Canaliser les eaux de ruissellement vers le parc à résidus, pour augmenter l'infiltration;
- Réduire les exfiltrations au niveau des digues en optimisant leur imperméabilité;
- Réduire la conductivité hydraulique du sous-sol, surtout si celui-ci est perméable, afin de limiter les exfiltrations en faveur du réseau d'eau souterraine;
- Réduire l'évaporation et faciliter l'infiltration à la surface des résidus en plaçant une couverture de matériaux granulaires au-dessus de ceux-ci.

### **2.5.2.2 Amélioration de la capacité de rétention en eau des résidus**

L'épaissement des résidus ou l'ajout d'un liant permet de réduire la porosité des résidus. (Senes, 1996). La porosité des résidus étant diminuée, la valeur de la PEA et donc la remontée capillaire augmente (Ouangrawa, 2007; Senes, 1996). Dans ce cas également, l'ajout d'une couche de



matériaux plus grossiers au-dessus des résidus permet de limiter l'évaporation, ce qui permet de réduire les pertes d'eau et ainsi maintenir plus d'eau dans les résidus.

### **2.5.2.3 Construction d'une barrière hydraulique verticale**

La construction d'une barrière hydraulique verticale à l'intérieur du parc à résidus a pour but de freiner l'écoulement des eaux en diminuant la conductivité hydraulique horizontale (Senes, 1996). La barrière hydraulique peut être constituée d'un mélange homogène de résidus fins et grossiers ou d'un mélange sol-bentonite, qui aura une conductivité hydraulique horizontale 10 à 100 fois plus faible que les résidus alentours. Cette barrière va alors provoquer la diminution de l'écoulement horizontal de l'eau de l'amont vers l'aval de celle-ci et ainsi permettre une remontée du niveau de la nappe phréatique en amont de la barrière (Ouangrawa, 2007; Senes, 1996).

## **2.5.3 Recouvrement monocouche**

Une couche de protection à la surface des résidus peut contribuer à limiter l'évaporation et ainsi améliorer le bilan d'eau sur le site. Dans le modèle conceptuel proposé par Aubertin et al. (1999), il est suggéré d'utiliser une couche de sable et/ou gravier à la surface des résidus comme barrière à l'évaporation. Ces couvertures à grains grossiers, du fait de leurs propriétés (faible rétention en eau et  $k_{sat}$  élevée), agissent en limitant les déplacements ascendants de l'eau et favorisent l'infiltration. L'augmentation de l'épaisseur de la couche de protection ou l'utilisation d'un matériau de granulométrie grossière (ayant une PEA plus faible que celle des résidus), permet de maximiser la saturation des résidus (Dagenais, 2005). Il a également été observé, lors d'essais en colonnes, qu'une importante désaturation de la couche de protection, par drainage et évaporation, se produit à la fin de chaque cycle de drainage alors que pour les résidus,  $S_r$  demeure élevé à 85-90% (Ouangrawa, Aubertin, Molson, Bussière et Zagury, 2010).

Les recouvrements monocouches ont d'abord été étudiés comme barrière à l'oxygène (Nicholson et al., 1989), comme alternative aux recouvrements en eau. L'ajout d'un recouvrement à granulométrie fine permet d'augmenter la remontée capillaire pour qu'elle atteigne ainsi le recouvrement, les résidus étant alors entièrement saturés. Des simulations numériques, faisant varier différents paramètres (flux initial d'oxygène,  $D_e$  et coefficient du taux de réaction  $K_r$ ), ont montré qu'au sein d'un recouvrement, la réduction du flux d'oxygène la plus efficace intervient

dans les premiers 50 cm du recouvrement. L'augmentation de l'efficacité avec la profondeur stagne et lorsque celle-ci dépasse 1 mètre (Nicholson et al., 1989).

Le concept de gestion intégrée (Bussière et al., 1995) peut être combiné à la mise en place d'un recouvrement monocouche en utilisant des résidus faiblement réactifs ou désulfurés (Demers, 2008; Romano, Ulrich Mayer, Jones, Ellerbroek et Blowes, 2003; Sjoberg, Wilson et Aubertin, 2001). Cette avenue présente des avantages économiques pour l'industrie, puisqu'elle permet d'éviter ou de réduire l'utilisation de matériaux naturels pour la mise en place du recouvrement. De plus, le flux d'oxygène peut être significativement réduit, lorsque de petites quantités de minéraux réactifs sont présentes dans la couverture, ce qui permet d'augmenter  $K_r$  et ainsi la consommation de l'oxygène dans la couverture (Mbonimpa et al., 2003).

#### **2.5.4 Synthèse des travaux de recherche**

Différents types de travaux de laboratoire, de modélisation numérique et de terrain ont été réalisés sur la technique de la nappe phréatique surélevée avec ou sans recouvrement monocouche depuis le début des années 2000. Le tableau 2.1 présente une synthèse de ces différents travaux comprenant les configurations testées et les principaux résultats obtenus.

Tableau 2.1 : Synthèse des travaux de recherche récents effectués sur la méthode de restauration (adapté de Ethier, 2018)

Site minier	Paramètres d'influence évalués		Résultats clés	Types de travaux	Auteurs
Detour Lake, ON	RM- Épaisseur, type et % sulfures	1,8 m – Résidus désulfurés– 0,5-1%S	- Niveau phréatique : contrôle principal sur le flux d'oxygène - Granulométrie des résidus et du recouvrement : influence de l'une par rapport à l'autre, le RM se comportera alors comme une barrière à l'oxygène ou à l'évaporation	Restauration d'une partie du parc à résidus	Dobchuk (2002), Dobchuk et al. (2013)
	RM - Épaisseur et type	1,8 m – Résidus désulfurés		Modélisation numérique 1D (x4) SoilCover	
	RM et Résidus - Granulométrie	Fin ou grossier			
	Niveau phréatique*	+1 m ou -4 m			
Lorraine, QC	RM - Épaisseur et type	50-51 cm - Sable	- Niveau phréatique : influence importante - Contenu en sulfures : influence importante - Épaisseur du recouvrement : influence importante - Granulométrie des résidus et du recouvrement : influence importante	Essais en colonnes (x4)	Dagenais (2005), Dagenais et al. (2006; 2001; 2002; 2011)
	Résidus - % sulfures	0,21%S			
	Résidus - Épaisseur	40-42 cm – Lorraine			
	Niveau phréatique*	-0,7 ou -1,4 m (0,5 $\psi_{90}$ - $\psi_{90}$ )			
Aldermac, QC	RM - Épaisseur et type	7,5 cm – Sable		Essais en colonnes (x2)	
	Résidus - Épaisseur	60 cm – Aldermac			
	Résidus - % sulfures	25,2%S			
	Niveau phréatique*	-25 cm			
Solbec-Cupra/Manitou, QC	RM - Épaisseur et type	44-46 cm – Sable		Essais en colonnes (x4)	
	RM - % sulfures	9,06%S			
	Résidus - Épaisseur	44-47 cm			
	Niveau phréatique*	-0,95 ou -1,9 m (0,5 $\psi_{90}$ - $\psi_{90}$ )			
Les 3 types de résidus utilisés en colonnes	RM - Épaisseur	Variable ou 30 cm		Modélisation numérique 1D (x14) SoilCover	
	RM et Résidus - Granulométrie	Idem colonnes, fin ou grossier			
	Taux d'évaporation	Variable ou 7,8 mm/j			
	Niveau phréatique*	0 m, -3 m			

Travaux de terrain, *essais en laboratoire* et *modélisation numérique*

RM : Recouvrement monocouche

\* à partir de l'interface entre le recouvrement monocouche et les résidus réactifs

Tableau 2.1 (suite) : Synthèse des travaux de recherche récents effectués sur la méthode de restauration (adapté de Ethier, 2018)

Site minier	Paramètres d'influence évalués		Résultats clés	Types de travaux	Auteur
Louvicourt et Sigma, QC	Résidus - Épaisseur et type	15 cm - Louvicourt (L), Sigma (S) ou mélange (M)	- Niveau phréatique : Profondeur optimale $\leq 1/2$ PEA - Composition minéralogique des résidus : effet non significatif lorsque $S_r > 90\%$	Essais en petites colonnes (x15)	Ouangrawa (2007), Ouangrawa et al. (2006, 2009, 2010)
	Résidus - % pyrite	4 % (S), 15% (M) ou 40% (L)			
	Niveau phréatique*	- 15 cm, -228 cm			
	RM - Épaisseur et type	20 cm - Sable			
	Résidus - Épaisseur et type	1,2-1,6 m – L ou M			
	Résidus - % pyrite	15% (M) - 40% (L)			
	Niveau phréatique*	- 55 cm, -175 cm			
	Idem que les colonnes expérimentales			Modélisation numérique Min3P	
Doyon, QC	RM - Épaisseur et type	0,5-1 m de Résidus désulfurés Doyon	- Niveau phréatique : influence principale - Contenu en sulfures : réduction des flux d'oxygène à la base du RM à court terme lorsque celle-ci contient une faible teneur en sulfures - Épaisseur du recouvrement : influence secondaire - Conditions climatiques	Essais en colonnes (x11)	Demers (2008), Demers et al. (2007, 2008, 2009)
	RM - % sulfures	0,25-1,25%S			
	Résidus – Épaisseur et type	30 cm – Doyon			
	Résidus - %sulfures	2-4%S			
	Niveau phréatique*	0 m, -1,3 m			
	RM - % sulfures	0,3, 0,6 ou 0,8%S		Modélisation numérique 1D (x15) Vadose/W	
	RM - Épaisseur	0,5, 0,75 ou 1 m			
	Niveau phréatique*	0,-0,75 et -1,5 m			

*Essais en laboratoire et modélisation numérique*

*RM : Recouvrement monocouche*

*\* à partir de l'interface entre le recouvrement monocouche et les résidus réactifs*

Tableau 2.1 (suite) : Synthèse des travaux de recherche récents effectués sur la méthode de restauration (adapté de Ethier, 2018)

Site minier	Paramètres d'influence évalués		Résultats clés	Types de travaux	Auteur
Selbaie, QC	Résidus – Épaisseur et type	50 cm – Selbaie peu ou visiblement oxydés	<ul style="list-style-type: none"><li>- Contenu en sulfures des résidus</li><li>- Niveau phréatique : influence sur la saturation des résidus</li><li>- Épaisseur du recouvrement : pas d'effet significatif</li><li>- Granulométrie du recouvrement : impact significatif</li><li>- Conditions climatiques</li></ul>	Essais en petites colonnes (x2)	Cosset (2009), Cosset et al. (2010)
	RM - Épaisseur et type	30 cm - Moraine		Essais en grandes colonnes (x2)	
	Résidus - Épaisseur et type	1,7 m - Selbaie peu ou visiblement oxydés		Modélisation numérique 1D (x13) SEEP/W	
	RM - Épaisseur	0,3, 1 ou 2 m			
	RM - Granulométrie	très fine, fine, moyenne, grossière			
	Niveau phréatique*	-1 à -15 m			
Goldex, Manitou et Selbaie, QC	RM - Épaisseur et type	30-40 cm – Goldex	<ul style="list-style-type: none"><li>- Résidus oxydés ou non oxydés : influence de la pré-oxydation sur l'efficacité de la méthode de restauration à contrôler le DMA</li><li>- Niveau phréatique : Influence primordiale</li><li>- Épaisseur du recouvrement : mince = peu d'efficacité épais = moins sensible aux variations climatiques</li><li>- Granulométrie du recouvrement et des résidus : pas d'influence de la granulométrie des résidus</li><li>- Conditions climatiques</li></ul>	Essais en grandes colonnes (x4)	Pabst (2011), Pabst et al. (2010, 2011a, 2011b, 2014, 2017a, 2017b)
	Résidus - Épaisseur et type	1,7 m - Manitou ou Selbaie oxydé ou non oxydé		Essais en petites colonnes (x4)	
	RM - Épaisseur et type	30-40 cm - Goldex			
	Résidus - Épaisseur et type	34,1 - 36,5 cm - Manitou ou Selbaie oxydé ou non oxydé		Modélisation numérique 1D Vadose/W	
	RM - Épaisseur	1 à 4 m			
	Niveau phréatique*	-1 à -6 m		Modélisation numérique 1D Min3P	
	Niveau phréatique*	-1 à -6 m			

*Essais en laboratoire et modélisation numérique*

*RM : Recouvrement monocouche*

*\* à partir de l'interface entre le recouvrement monocouche et les résidus réactifs*

Tableau 2.1 (suite) : Synthèse des travaux de recherche récents effectués sur la méthode de restauration (adapté de Ethier, 2018)

Site minier	Paramètres d'influence évalués		Résultats clés	Types de travaux	Auteur
Goldex et Manitou, QC	RM - Épaisseur et type	0,5-1 m de résidus Manitou oxydé	- Granulométrie (résidus et recouvrement) - Contenu en sulfures des résidus - Épaisseur du recouvrement - Résidus oxydés ou non oxydés	Essais en colonnes (x13)	Bussière et al. (2008, 2009, 2011, 2012), Demers et al. (2013)
	Résidus - % sulfures	5,8-15,4%S			
	Niveau phréatique*	0, -0,5 et -1,9 m			
Doyon-Westwood, QC	RM- Épaisseur et type	0,5 ou 1 m - Résidus Goldex 0,15 m - Gravier	- Épaisseur du recouvrement - Présence d'une barrière à l'évaporation - Niveau phréatique  - Suivi 2015 à octobre 2017 : teneur en eau volumique, succion, débit, analyses géochimiques des lixiviats	Cellules de terrain (x3)	Rey et al. (2016, 2017)
	Résidus - Épaisseur et type	1 m - Doyon			
	Niveau phréatique*	-1 et -2 m (0,5PEA-1PEA)			
	RM - Épaisseur et type	0,5-1 m de résidus Westwood ou Goldex	- Composition et épaisseur du recouvrement - Niveau phréatique	Essais en colonnes (x12)	
	RM - % soufre	0,13-0,17 %S			
	Résidus – Épaisseur, type, % soufre	30 cm - Doyon - 4,34%S			
	Niveau phréatique*	0, -1 et -2 m			

Travaux de terrain, *essais en laboratoire* et *modélisation numérique*

RM : Recouvrement monocouche

\* à partir de l'interface entre le recouvrement monocouche et les résidus réactifs

Tableau 2.1 (suite) : Synthèse des travaux de recherche récents effectués sur la méthode de restauration (adapté de Ethier, 2018)

Site minier	Paramètres d'influence évalués		Résultats clés	Types de travaux	Auteur
Manitou et Goldex, QC	RM- Épaisseur et type	1,2-2,1 m - Résidus Goldex	- Suivi aout 2012 à aout 2015 : - 13 stations de mesures : niveau piézométrique, teneur en eau volumique, succion, concentration d'O <sub>2</sub> gazeux dans les pores - Essai de consommation d'oxygène : 3x en 2015 et 2x en 2017 – 4 stations (1, 4, 2, 5)	Restauration du parc à résidus #2	Ethier (2018), Éthier et al. (2013, 2014, 2016, 2018)
	Résidus - Épaisseur et type	0,8-2,1 m - Manitou			
	RM – Épaisseur et type	1,18, 1,30 et 1,55 m – Résidus Goldex	- Estimation du coefficient du taux de réaction K <sub>r</sub> dans les résidus Goldex et Manitou	Modèle 1D Vadose/W	
	Résidus – Épaisseur et type	1 m - Manitou			
	RM – Épaisseur	1,2 m à 2,1 m	- Calibration basée sur le suivi des niveaux piézométriques - Influence des changements climatiques simplifiés sur le niveau phréatique	Modèle 3D du parc à résidus #2 de Manitou GOCAD et HydroGeoSphere	
	RM - Granulométrie	Calibrée à partir des données expérimentales des résidus Goldex : dense, lâche, fin grossier			
	Résidus – Épaisseur et type	0,8-2,1 m - Manitou			
	Conditions climatiques	Climat normal ou changement climatique simplifié			
	RM et Résidus - Granulométrie	Fin ou grossier			
	Niveau phréatique*	-2.2 m			
Conditions climatiques	Prédictions climatiques selon MCG (RCP6.0 et RCP8.5)				

Travaux de terrain, *essais en laboratoire* et *modélisation numérique*

RM : Recouvrement monocouche

\* à partir de l'interface entre le recouvrement monocouche et les résidus réactifs

Tableau 2.1 (suite) : Synthèse des travaux de recherche récents effectués sur la méthode de restauration (adapté de Ethier, 2018)

Site minier	Paramètres d'influence évalués		Résultats clés	Types de travaux	Auteur
Detour Lake, ON	RM - Épaisseur et type	1,8 m – Résidus désulfurés	- RM grossier : Efficacité à limiter le flux d'oxygène varie en fonction de la granulométrie des résidus sous-jacents. Performance peu affectée par les changements climatiques - RM fin : Grande sensibilité aux changements climatiques. Évaporation plus importante	Modèle 1D Vadosé/W	Ahmad (2018)
	RM et Résidus - Granulométrie	Fin ou grossier			
	Niveau phréatique*	-2.2 m			
	Conditions climatiques	Prédictions climatiques selon MCG (RCP6.0 et RCP8.5)			

Travaux de terrain, *essais en laboratoire* et *modélisation numérique*

RM : Recouvrement monocouche

\* à partir de l'interface entre le recouvrement monocouche et les résidus réactifs



Ces différentes études ont permis de synthétiser les paramètres clés qui régissent l'efficacité de la méthode de restauration et sont présentés au tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Paramètres principaux influençant la performance de la technique de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche

Paramètres clés	Explication	Études
<i>Niveau de la nappe phréatique</i>	L'efficacité de la technique augmente avec un niveau de la nappe phréatique plus haut.	Bussière et al. (2012; 2011), Cosset (2009), Cosset et al. (2010), Dagenais (2005), Dagenais et al. (2001; 2002; 2006; 2011), Demers (2008), Demers et al. (2013), Dobchuk (2002), Dobchuk et al. (2013), Ethier (2018), Ouangrawa (2010)
	L'efficacité est optimale lorsque le niveau est supérieur ou égal à l'interface entre les résidus et le recouvrement.	Demers (2008), Demers et al. (2013), Pabst (2011), Pabst et al. (2010, 2011a, 2011b, 2014, 2017a, 2017b)
	Le nouveau critère de design définit le niveau de la nappe comme devant être inférieur ou égal à la moitié de la valeur de la pression d'entrée d'air des résidus ( $h \leq 0.5 \text{PEA}$ ).	Ouangrawa (2007)
<i>Propriétés des matériaux</i>	La granulométrie, l'indice des vides ainsi que les propriétés de rétention d'eau vont avoir un impact significatif sur la position de la nappe phréatique au sein des résidus.	Dagenais (2005), Dobchuk et al. (2013), Ethier (2018), Éthier et al. (2013; 2018), Ouangrawa (2007), Pabst (2011)
	Le contraste de granulométrie entre le recouvrement et les résidus va avoir un impact sur le comportement du recouvrement (barrière à l'évaporation ou à l'oxygène).	Cosset (2009)
<i>Teneur en sulfures des résidus</i>	Plus les résidus sont réactifs plus l'efficacité en sera affectée. Cependant, si les résidus demeurent proches de la saturation ( $S_r \geq 90 \%$ ), cette influence ne s'exerce plus.	Dagenais (2005; 2006), Ouangrawa (2007; 2006)
<i>Pré-oxydation des résidus</i>	La présence de résidus préalablement oxydés peut impliquer la mise en place de critères plus sévères (niveau de la nappe, épaisseur du recouvrement) pour permettre à la technique d'être efficace. Cependant, les mécanismes d'oxydation secondaire peuvent se poursuivre pour continuer à produire du DMA.	Demers et al. (2013), Ethier (2018), Ethier et al. (2013), Pabst (2011)
<i>Évaporation</i>	Si le recouvrement monocouche ne limite pas suffisamment l'évaporation, celle-ci a un impact significatif sur l'efficacité de la méthode à limiter le flux d'oxygène vers les résidus.	Bussière et al. (2011), Dagenais (2005), Demers et al. (2013), Pabst (2011)
<i>Épaisseur du recouvrement</i>	L'augmentation de l'épaisseur du recouvrement améliore l'efficacité jusqu'à un certain point. Dépassé une certaine valeur, l'impact devient minime.	Cosset (2009), Demers (2008), Pabst (2011)
<i>Teneur en sulfures du recouvrement</i>	La présence d'une faible quantité de sulfures dans le recouvrement permet de diminuer le flux d'oxygène se rendant aux résidus.	Demers (2008), Sjoberg et al. (2001)

Tableau 2.2 (suite) : Paramètres principaux influençant la performance de la technique de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche

Paramètres clés	Explication	Études
<i>Périodes de sécheresses</i>	La technique de restauration est sensible aux périodes de sécheresse qui peuvent provoquer une diminution du niveau de la nappe phréatique en dessous du critère de design.	Ethier et al. (2018)
<i>Influence des changements climatiques</i>	Le changement du régime de précipitations et de la durée/sévérité des périodes de sécheresses n'auront pas le même impact sur l'efficacité d'un recouvrement monocouche selon sa granulométrie.	Ahmad (2018)

### 2.5.5 Vulnérabilité aux changements climatiques

Le niveau de la nappe phréatique influence la performance de la méthode de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche. Les paramètres du bilan hydrique influençant le niveau de la nappe sont les précipitations, l'infiltration, le ruissellement et la circulation de l'eau souterraine (figure 2.6). La modification du régime des précipitations dû aux changements climatiques va donc avoir un impact sur le niveau de la nappe phréatique. Les projections climatiques pour le Québec prévoient une augmentation des précipitations, mais également une augmentation de l'intensité des événements extrêmes dont les sécheresses (Desjarlais et Blondlot, 2010). En plus de l'impact sur ce paramètre clé, plusieurs autres risques potentiels pour maintenir l'efficacité de la technique ont été identifiés (URSTM, 2017) :

- Fluctuation plus importante du niveau de la nappe phréatique en raison de l'augmentation des précipitations et des températures : l'augmentation des précipitations a un impact positif sur la performance de la méthode de restauration.
- Variation du degré de saturation ( $S_r$ ) des résidus en période sèche en dessous des 90%, en particulier pour les cas où la nappe phréatique se situe sous l'interface entre le recouvrement et les résidus : une diminution du niveau de la nappe phréatique aurait pour conséquence de diminuer la saturation des résidus situés au-dessus de ce niveau et ainsi ne plus limiter la diffusion de l'oxygène.
- Potentiel d'instabilité géotechnique des digues de confinement causée par l'augmentation des précipitations (moyennes et extrêmes) et des cycles de gel/dégel : bien que n'ayant pas d'impact direct sur la performance de la technique, l'intégrité des ouvrages de retenue demeure un point important dans la gestion des risques.

- Efficacité des réseaux de drainage affectée par les quantités d'eau plus importantes en particulier lors d'évènement extrêmes : les conséquences ne concernent pas directement la performance de la méthode de restauration mais ont aussi un impact sur l'intégrité des infrastructures de gestion des eaux qui pourrait avoir des répercussions sur l'intégrité des digues.

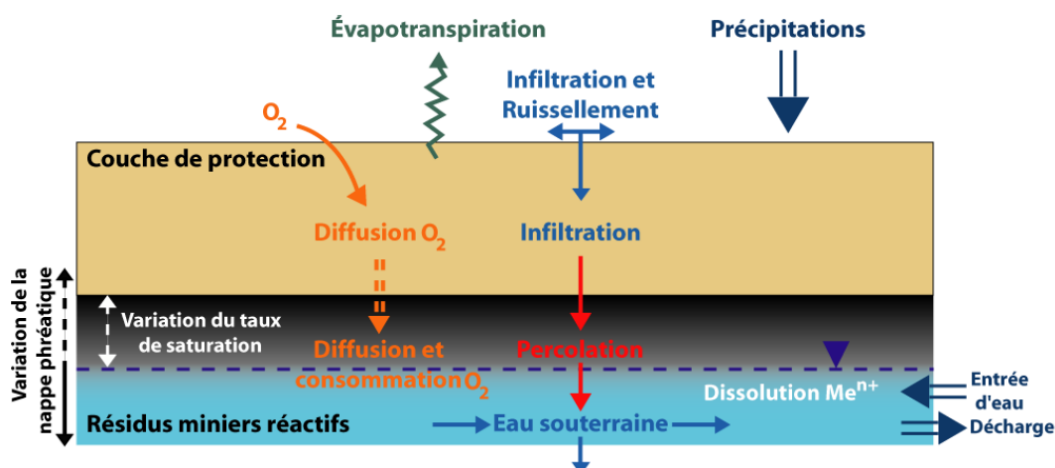


Figure 2.6 : Processus affectant l'efficacité de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche (URSTM, 2017)

## 2.6 Facteurs et changements climatiques

### 2.6.1 Définitions et concepts de la modélisation climatique

#### 2.6.1.1 Modèle, simulation et projection climatiques

Un modèle climatique est une représentation numérique de l'ensemble du globe ou d'une partie de celui-ci. Il simule le comportement et les interactions entre l'atmosphère, la lithosphère, l'hydrosphère, la cryosphère et la biosphère, dans des conditions données de radiation solaire et d'émissions anthropiques (Charron, 2016; Drobinski, 2016). Les interactions entre ces différentes composantes terrestres sont définies par plusieurs équations mathématiques (conservation de la masse et de l'énergie), afin de représenter l'évolution du climat (Charron, 2016). Comme le climat est de nature chaotique, il n'est pas possible d'obtenir une solution analytique exacte de ces équations mathématiques. Afin d'obtenir un résultat, il faut donc avoir recours à la simulation numérique pour résoudre l'ensemble de ces équations. La représentation numérique est découpée

en cellules de grille tridimensionnelle appelées mailles dont la résolution varie en fonction de l'échelle d'observation globale ou régionale (Charron, 2016).

Le modèle est défini à l'aide de données géophysiques (types de sol et de végétation, limites côtières, emplacement et bathymétrie des grandes étendues d'eau, topographie) et initialisé avec des variables météorologiques (températures, précipitations, humidité, etc.) connues qui se rapprochent d'un état climatique historique (Charron, 2016; Drobinski, 2016). Une fois défini, le modèle climatique peut être résolu numériquement selon différents paramètres dont une période de temps définie et ainsi obtenir une simulation climatique (Charron, 2016).

La durée de la simulation peut s'étendre sur un nombre d'années très variable et le calcul se fera de manière itérative selon des intervalles appelés pas de temps. La valeur du pas de temps (5 à 20 min), en fonction de la résolution spatiale et du schéma d'intégration numérique, va définir la résolution temporelle de la simulation. La résolution d'archivage des résultats est définie selon des intervalles horaires variant de 1h à 24h (Charron, 2016).

Pour chaque maille du modèle climatique et chaque pas de temps, des variables climatiques descriptives sont obtenues (températures, précipitations liquides et solides, vent, etc.). Celles-ci sont cohérentes entre elles d'une maille à une autre et d'un instant à un autre (Charron, 2016).

Les simulations climatiques peuvent s'effectuer sur des périodes passées et futures. Les projections climatiques sont obtenues pour des périodes futures. Ces projections, pouvant couvrir plusieurs décennies à plusieurs siècles, présentent une évolution plausible des variables climatiques en fonction de différents forçages climatiques, comme par exemple l'augmentation de la concentration des GES dans l'atmosphère (Charron, 2016). Les projections climatiques permettent d'obtenir des indicateurs climatiques.

Afin d'obtenir des résultats de projections climatiques les plus représentatifs possibles, il est nécessaire d'utiliser un ensemble de simulations. Ces différentes simulations permettent de prendre en compte différents scénarios d'évolution socio-économique, la variabilité naturelle du climat ainsi que la structure même des modèles comme par exemple la résolution des équations et la résolution spatiale choisie (Charron, 2016). Le projet CMIP « Coupled Models Intercomparison » est un exemple d'ensemble de simulations. Ce projet permet de réaliser des simulations climatiques coordonnées entre différents groupes de recherche sur le climat à l'échelle mondiale. La phase 5 de ce projet (CMIP5) a regroupé 20 centres climatiques à travers le monde, ce qui représente plus

de 50 modèles climatiques numériques. Ce grand nombre de modèles et de simulations qui en découlent permet une meilleure estimation des différences entre les modèles climatiques et en particulier d'estimer l'incertitude inhérente à ce type de simulation numérique (Taylor, Stouffer et Meehl, 2012).

## **2.6.2 Techniques de mise à l'échelle**

Les modèles climatiques globaux (MCG), représentation de grande échelle, sont composés de mailles dont la dimension est supérieure à la centaine de kilomètres (de l'ordre de 100 à 500 km). La résolution grossière des MCG ne permet pas une étude représentative, à une échelle plus locale, de phénomènes tels que les événements extrêmes ou les impacts des changements climatiques (Drobinski, 2016).

Une mise à l'échelle peut être nécessaire afin de définir une dimension de maille plus fine, de la dizaine de kilomètres, afin de mieux définir ces phénomènes. Elle est de type dynamique ou statistique.

### **2.6.2.1 Mise à l'échelle dynamique**

Dans le cas de la mise à l'échelle dynamique, on utilise des modèles climatiques régionaux (MCR), qui permettent de raffiner la résolution du climat sur une région donnée du globe (Charron, 2016).

Afin que les résultats du MCR soient cohérents avec ceux du MCG, celui-ci fournit des conditions aux frontières de l'état de l'atmosphère à grande échelle afin de simuler des phénomènes locaux à plus petite échelle comme par exemple des orages (Drobinski, 2016). Cette technique assure une cohérence dans le temps et dans l'espace des données climatiques (Charron, 2016).

### **2.6.2.2 Mise à l'échelle statistique**

L'approche de la mise à l'échelle statistique repose sur l'hypothèse que le climat observable sur une région donnée dérive de données climatiques mondiales à grande échelle, appelées prédicteurs. Des relations statistiques sont établies entre les conditions locales de la région à l'étude et les prédicteurs qui découlent des données du climat récent (Charron, 2016).

Cette approche appliquée à une simulation du climat futur, à l'aide d'un MCG, est basée sur l'hypothèse que ces relations statistiques ne changeront pas dans le temps. Cette hypothèse peut

être problématique quand on étudie les changements climatiques, car le climat n'a pas un comportement stationnaire et il est difficile de valider cette hypothèse (Charron, 2016).

De plus, dans le cas de la mise à l'échelle statistique, comme il est difficile de traiter l'ensemble des variables climatiques en même temps, elles vont être traitées une à une. Certains liens entre les variables pourraient alors être mal pris en compte, ce qui pourrait entraîner une perte de cohérence spatiotemporelle des données (Charron, 2016).

En contrepartie, cette approche est plus facile à mettre en place que la mise à l'échelle dynamique et peut être facile à utiliser si l'on souhaite étudier des problématiques ne se rapportant qu'à une seule variable (Charron, 2016).

### **2.6.3 Techniques de post-traitement**

Les données obtenues à partir d'une simulation d'un modèle climatique ne sont habituellement pas utilisées directement. Une technique de post-traitement doit être appliquée afin de les convertir (Charron, 2016).

Même si le modèle climatique se veut le plus près possible de la réalité, il subsiste souvent un biais en ce qui concerne l'estimation des données climatiques par les calculs mathématiques utilisés dans le modèle. En utilisant les résultats de plusieurs simulations, on s'assure que ce biais, inhérent à l'exercice même de modélisation climatique, soit pris en compte et ainsi avoir les résultats les plus plausibles possibles (Charron, 2016).

Les méthodes de correction des biais, utilisées en post-traitement, comparent les séries temporelles produites par le modèle climatique à des séries temporelles issues d'observations. Elles ont pour but premier de corriger les données de sortie du modèle au moyen de données observationnelles (Ward et al., 2015).

Ces méthodes reposent sur l'hypothèse de stationnarité, c'est-à-dire qu'il est considéré que les biais entre les observations et données des modèles sont constants, et donc indépendants de la période de contrôle. Il est alors possible selon cette hypothèse, d'appliquer le même algorithme de correction aux conditions climatiques actuelles et aux conditions climatiques futures (Teutschbein et Seibert, 2012).

Les méthodes de correction des biais les plus couramment utilisées sont les suivantes : la méthode du delta, la mise à l'échelle linéaire et la correction quantile-quantile.

La méthode du delta a pour but d'identifier les anomalies du MCR et de les appliquer aux données observées durant la période de référence. La correction s'effectue normalement sur une périodicité mensuelle, mais se généralise à d'autres échelles temporelles (Ward et al., 2015).

La mise à l'échelle linéaire est basée sur les différences entre valeurs observées et valeurs simulées durant la période de référence (Ward et al., 2015). Dans ce cas, le facteur de correction du taux de précipitation est égal au rapport entre données moyennes observées et données moyennes simulées; pour la température, il faut ajouter la différence entre données moyennes observées et données moyennes simulées (Teutschbein et Seibert, 2012; Ward et al., 2015).

Lorsque la méthode de correction quantile-quantile est utilisée, l'ensemble des pas de temps de la fonction de distribution de probabilités (FDP) de la variable climatique simulée est ajusté. La valeur corrigée est estimée en fonction de la valeur originale, au moyen d'une fonction de transfert calculée où la fonction de répartition (FDC) des variables observées et la FDC des variables simulées durant la période de référence doivent être égales (Piani et al., 2010). La variable (température ou précipitation par exemple) corrigée est alors obtenue au moyen de l'équation suivante :

$$X^* = F_{obs}^{-1}(F_{rcm}X_{rcm}) \quad (2.30)$$

<b>Paramètre</b>	<b>Définition</b>
$X^*$	Variable climatique corrigée
$F_{obs}$	FDC des données d'observation
$F_{rcm}$	FDC des données simulées
$X_{rcm}$	Variable climatique originale

Différentes méthodes de correction quantile-quantile existent dont la transformation sur distribution, la transformation non paramétrique (quantiles empiriques) et la transformation paramétrique (Berg, Feldmann et Panitz, 2012; Gudmundsson, Bremnes, Haugen et Engen-Skaugen, 2012; Teutschbein et Seibert, 2012). Pour la méthode de transformation sur distribution, les transformations statistiques sont réalisées au moyen de distributions graphiques théoriques. Pour le taux de précipitation par exemple, la distribution la plus couramment utilisée pour

représenter la FDP est la courbe de Gamma, alors que dans le cas de la température, ce sera la courbe de Gauss qui sera utilisée comme illustré à la figure 2.7 (Teutschbein et Seibert, 2012).

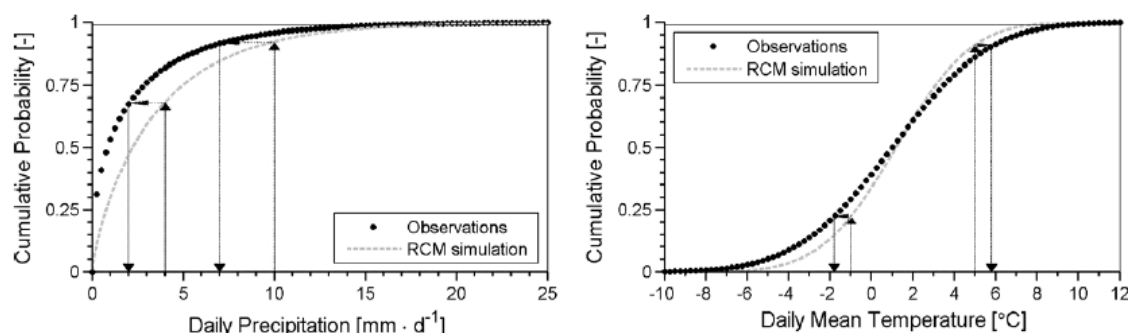


Figure 2.7 : Exemple d'une procédure de transformation sur distribution : distribution Gamma des précipitations et distribution Gaussienne des températures (Teutschbein et Seibert, 2012).

La transformation non paramétrique ne pose aucune hypothèse quant à la distribution des données. À l'aide de tableaux de centiles, les FDC empiriques sont déterminées et utilisées pour calculer la valeur corrigée de la variable (Berg et al., 2012). Cependant, cette méthode est sujette à l'échantillonnage. Enfin, les transformations paramétriques permettent de modéliser directement la relation quantile-quantile grâce à différents types d'équations permettant d'estimer la meilleure valeur possible de la variable climatique étudiée en fonction de la valeur d'origine de la variable et des paramètres de calibration (Gudmundsson et al., 2012).

## 2.6.4 Scénario de forçage radiatif (RCP)

Dans le cadre du projet CMIP5, diverses trajectoires de concentration représentatives RCP « Representative Concentration Pathways » ont été employées. Ces scénarios RCP représentent les différentes évolutions possibles de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère en fonction de l'évolution socio-économique à l'échelle planétaire durant les prochaines décennies. Ces scénarios sont nommés selon la valeur du forçage radiatif total qu'ils devraient atteindre en 2100 (Charron, 2016; Roy, 2015).

Le forçage radiatif est défini en climatologie par la différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par un système donné. Dans le cadre de l'étude des changements climatiques, le forçage radiatif va mesurer la capacité d'un facteur, par exemple un gaz à effet de serre, à perturber l'équilibre énergétique du système, ici l'atmosphère, dans ce cas-ci en provoquant



un réchauffement (Myhre, Highwood, Shine et Stordal, 1998; Shine, Cook, Highwood et Joshi, 2003).

Comme il n'est pas possible de connaître avec certitude quelle sera l'évolution socio-économique future, il faut utiliser pour les simulations climatiques plusieurs scénarios RCP. Le tableau 2.3 et la figure 2.8 illustrent les caractéristiques et l'évolution du forçage radiatif des différents scénarios RCP.

Tableau 2.3 : Caractéristiques des différents scénarios RCP (adapté de Moss et al., 2010)

Scénario	Forçage radiatif en 2100	Équivalent CO <sub>2</sub>	Anomalie globale de température	Évolution temporelle du forçage radiatif
	(W/m <sup>2</sup> )	(ppm)	(°C)	
<b>RCP8.5</b>	>8.5	1370	4.9	Augmentation
<b>RCP6.0</b>	6	850	3.0	Stabilisation après 2100 sans plateau
<b>RCP4.5</b>	4.5	650	2.4	Stabilisation avant 2100 avec plateau
<b>RCP2.6</b>	3	490	1.5	Pic avant 2100 puis déclin

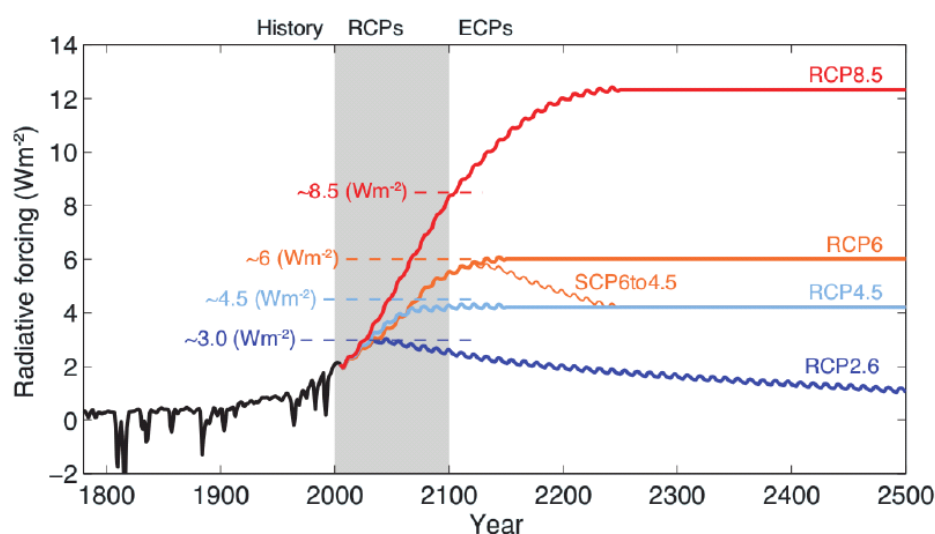


Figure 2.8 : Évolution temporelle du forçage radiatif selon les différents scénarios RCP (Roy, 2015)

Le RCP4.5 correspond à un scénario où des actions seraient entreprises afin de limiter l'émission de gaz à effet de serre afin que le forçage radiatif atteigne un maximum de 4.5 W/m<sup>2</sup> d'ici 2100 et se stabilise autour de cette valeur par la suite. Ces actions comprennent des changements du système énergétique planétaire en limitant l'utilisation de technologies émettrices de gaz à effets

de serre et en développant des nouvelles technologies de capture et de stockage du carbone de l'atmosphère (Thomson et al., 2011).

Le RCP8.5 considère le cas où peu ou pas de changements seraient apportés à la génération de GES. Ce scénario prévoit que le flux radiatif pourrait atteindre dans ce cas  $8.5\text{W/m}^2$  en 2100 et continuerait à augmenter par la suite (Riahi et al., 2011).

## **2.7 Changements climatiques attendus pour la région de l'Abitibi**

Un document intitulé « Synthèse des changements climatiques pour le secteur minier » a été rédigé par le consortium Ouranos en 2015. Ce document chiffre les changements climatiques projetés pour plusieurs régions minières du Québec dont l'Abitibi, où se situe le site minier étudié dans le cadre de cette étude. Il présente un ensemble d'indicateurs climatiques permettant de caractériser l'effet des changements climatiques sur ces différentes régions (Roy, 2015). Dans cette section, il sera uniquement questions des indicateurs climatiques et de leurs résultats pertinents dans le cadre des travaux de recherche présentés dans ce mémoire.

Dans le cadre de l'étude d'Ouranos, 20 modèles climatiques ont été utilisés permettant d'obtenir plus de 43 simulations par scénario RCP utilisé. Deux scénarios RCP ont été utilisés soit le RCP4.5 et le RCP8.5 (Roy, 2015).

Les données obtenues par les simulations effectuées dans le cadre de cette étude ont été soumises à une technique simple de correction de biais (méthode du delta). Sur la période commune (1981-2010), la différence entre les données climatiques des observations et de la simulation représente le biais de l'indicateur. Ce biais est ensuite soustrait des simulations (Roy, 2015).

Les indicateurs climatiques quantitatifs calculés pour la région de l'Abitibi grâce aux simulations numériques réalisées par Ouranos sont présentés au tableau 2.4. Ces indicateurs ont d'abord été calculés sur une base annuelle, puis une moyenne climatologique est calculée pour une période donnée à partir des valeurs annuelles de cette période (Roy, 2015).

Tableau 2.4 : Liste des indicateurs climatiques quantitatifs (adapté de Roy, 2015)

<b>Indicateur climatique</b>	<b>Définition</b>
<i>Température moyenne en hiver</i>	Moyenne annuelle de la température entre décembre et février
<i>Température moyenne en été</i>	Moyenne annuelle de la température entre juin et août
<i>Température minimale annuelle</i>	Température minimale atteinte durant l'année
<i>Température maximale annuelle</i>	Température maximale atteinte durant l'année
<i>Nombre de jours sans gel</i>	Nombre de jours où la température minimale quotidienne est supérieure à 0°C
<i>Précipitation annuelle</i>	Accumulation annuelle des précipitations liquides et solides
<i>Précipitations extrêmes</i>	Valeur annuelle du 99 <sup>e</sup> centile de précipitation
<i>Accumulations lors d'événements extrêmes</i>	Pourcentage des accumulations causées par de fortes pluies
<i>Nombres de jours avec précipitations supérieures à 10 mm</i>	Nombre de jours où la précipitation quotidienne est supérieure à 10 mm

Trois autres indicateurs climatiques qualitatifs sont également présentés dans le cadre de cette étude (tableau 2.5). Les résultats qui en découlent ne sont pas numériques, ils donnent une tendance de l'évolution de l'indicateur (plus ou moins élevé, plus tôt ou plus tard, augmentation ou diminution).

Tableau 2.5 : Liste des indicateurs climatiques qualitatifs (adapté de Roy, 2015)

<b>Indicateur climatique</b>	<b>Définition</b>
<i>Période de fonte</i>	Date à laquelle le couvert de neige disparaît
<i>Accumulation maximale de neige</i>	Accumulation maximale de la neige durant l'année
<i>Période de retour des événements extrêmes de précipitation</i>	Analyse par GEV <sup>1</sup> des périodes de retour des maximums annuels

<sup>1</sup> : Distribution généralisée des valeurs extrêmes.

Le tableau 2.6 présente pour la région de l'Abitibi, les augmentations projetées par rapport à la climatologie 1981-2010 pour l'ensemble des indicateurs climatiques quantitatifs selon les différents scénarios RCP utilisés pour les horizons temporels de 2020, 2050 et 2080 (Roy, 2015).

Tableau 2.6 : Augmentation projetée pour les paramètres climatiques quantitatifs selon les deux scénarios RCP utilisé pour différents horizons temporels (adapté de Roy, 2015)

Paramètres climatiques	RCP	Horizons temporels		
		2020	2050	2080
<i>Température moyenne en été (°C)</i>	4,5	1,34	2,5	3,15
	8,5	1,47	3,44	5,92
<i>Température moyenne en hiver (°C)</i>	4,5	1,62	3,13	4,04
	8,5	1,66	4,27	7,25
<i>Température minimale annuelle (°C)</i>	4,5	2,41	4,75	6,33
	8,5	2,48	6,85	12,53
<i>Température maximale annuelle (°C)</i>	4,5	1,51	2,75	3,45
	8,5	1,61	3,71	6,51
<i>Nombre de jours sans gel</i>	4,5	10,98	20,42	26,36
	8,5	11,1	28,36	49,85
<i>Précipitation annuelle (%)</i>	4,5	4,03	8,29	10,7
	8,5	4,26	10,18	16,13
<i>Précipitations extrêmes (%)</i>	4,5	4,79	11,49	13,52
	8,5	8,29	16,13	22,2
<i>Accumulations lors d'événements extrêmes (%)</i>	4,5	7,73	17,12	21,48
	8,5	9,32	20,35	32,37
<i>Nombre de jours avec précipitations supérieures à 10 mm</i>	4,5	0,46	0,95	1,09
	8,5	0,48	1,06	1,4

Les conclusions pour les indicateurs climatiques qualitatifs, pour la région de l'Abitibi, jusqu'en 2080 sont :

- *Période de retour des événements extrêmes* : un événement qui revenait en moyenne tous les 20 ans devrait se produire tous les 15-17,5 ans;
- *Période de fonte* : plus tôt, c'est-à-dire qu'elle devrait survenir environ 1 mois plus tôt que pendant la période historique 1971-2000;
- *Accumulation maximale de neige* : baisse.

## 2.8 Simulations numériques

Plusieurs codes numériques sont disponibles afin d'étudier des contextes hydrogéologiques comme par exemple : POLLUTE, MODFLOW, HELP, HYDRUS, UNSAT-H, et HydroGeoSphere. Le code SEEP/W de la suite GeoStudio (GeoSlope Inc.) a été choisi pour la réalisation du modèle numérique dans le cadre de ces travaux de recherche.

### 2.8.1 Caractéristiques du code numérique SEEP/W

Le code numérique SEEP/W permet de modéliser des écoulements 1D ou 2D en milieu non saturé, en utilisant la méthode des éléments finis (résolution numérique d'équations aux dérivées partielles). Il peut permettre de simuler les mouvements de l'eau, de la chaleur et des gaz, en particulier l'oxygène, en régimes permanent et transitoire (Geo-Slope International Ltd., 2017). SEEP/W permet aussi d'intégrer les conditions climatiques de surface, les interactions sol-climat ainsi que les effets de la neige et du gel, ce qui permet d'obtenir des simulations les plus proches possibles de ce qui pourrait être observé sur le terrain (Choo et Yanful, 2000; Cissokho, 2008; Shackelford et Benson, 2006). SEEP/W a été utilisé dans plusieurs travaux de recherche en milieu saturé et non saturé ainsi qu'en régimes permanent et transitoire (Aubertin, Bussière, Aachib, Chapuis et Crespo, 1996; Chapuis, Chenaf, Bussière, Aubertin et Crespo, 2001; Chapuis, Crespo, Chenaf et Aubertin, 1993; Crespo, 1995; Demers et al., 2009; Ethier, Bussière, Aubertin, et al., 2018; Pabst, 2011). Le calcul des succions, des teneurs en eau volumiques et de l'évapotranspiration est plus précis avec SEEP/W qu'avec UNSAT-H (Benson et al., 2005; Pabst, 2011; Song et Yanful, 2008). Le comportement à long terme des couvertures (comme dans le cas de méthodes de restauration) serait prédit avec plus de précisions qu'avec UNSAT-H, HELP ou HYDRUS-2D (Christensen, Barbour, O'Kane et Meiers, 2002; Pabst, 2011).

Lorsqu'utilisé pour la modélisation de méthodes de restauration comme la technique de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche, SEEP/W peut permettre d'optimiser la configuration du recouvrement en modélisant l'écoulement de l'eau au sein du recouvrement (Ahmad, 2018; Cosset, 2009; Demers, 2008; Pabst, 2011), et aussi de modéliser l'évolution de la concentration d'oxygène dans le recouvrement (Ethier, Bussière, Aubertin, et al., 2018; Ethier et al., 2013). SEEP/W résout les équations de Fick pour calculer le mouvement de l'oxygène au sein du système étudié. Comme le système étudié est composé de matériaux réactifs (résidus désulfurés ou non), l'oxygène est alors consommé lors de sa migration par les réactions d'oxydation des minéraux sulfureux, la seconde loi modifiée de Fick est alors utilisée (cf. section 2.3.1). En ce qui concerne le mouvement de l'eau au sein d'un recouvrement, SEEP/W utilise l'équation de Richards (cf. section 2.1.2).

## 2.8.2 Interaction entre la surface du sol et le climat

Les mouvements de l'eau au sein des résidus et/ou du recouvrement sont influencés par les conditions climatiques en surface. La fonctionnalité « Interaction Sol-climat » de SEEP/W permet d'intégrer aux modèles numériques des données climatiques complètes soit la température de l'air, les précipitations, l'humidité relative, la vitesse du vent, le rayonnement et l'albédo. Le rayonnement est estimé par le logiciel et l'évolution de l'albédo est obtenue à partir de données théoriques. La méthode de calcul de l'évaporation doit être sélectionnée et celle-ci est calculée par le logiciel. Les précipitations sous forme de neige peuvent également être prises en compte.

### 2.8.2.1 Rayonnement

Le type de rayonnement à sélectionner peut-être de deux types, soit net ou solaire. Un ensemble d'équations détaillées ci-après permet au logiciel de calculer ou d'estimer ce rayonnement (Geo-Slope International Ltd., 2017). Le rayonnement extraterrestre est fonction de la latitude, de la date et de l'heure de la journée, et se définit selon l'équation suivante :

$$q_{\text{ext}} = \frac{(24)(60)}{\pi} G_{\text{sc}} d_r [\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s] \quad (2.31)$$

Paramètre	Définition
$q_{\text{ext}}$	Rayonnement extraterrestre [ $\text{MJ.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$ ]
$G_{\text{sc}}$	Constante solaire = $118 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$
$d_r$	Distance relative inverse Terre-Soleil [L]
$\omega_s$	Angle de l'heure du coucher de soleil [rad]
$\varphi$	Latitude [rad]
$\delta$	Déclinaison solaire [rad]

La surface de la terre reflète une quantité considérable de rayonnement solaire dans l'atmosphère. La partie réfléchie est connue sous le nom d'albédo ( $\alpha$ ) et elle dépend des caractéristiques de la surface (parmi d'autres paramètres). Le rayonnement solaire net atteignant la surface de la terre (direct et diffus), appelé également rayonnement net à ondes courtes, est donné comme suit :

$$q_{\text{ns}} = (1 - \alpha) q_s \quad (2.32)$$

Paramètre	Définition
$q_{\text{ns}}$	Rayonnement solaire net [ $\text{MJ.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$ ]
$q_s$	Rayonnement ondes courtes [ $\text{MJ.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$ ]
$\alpha$	Albédo

Dans cette équation, le rayonnement solaire net est mesuré sur une surface horizontale. L'albédo est souvent basé sur des mesures de terrain ou sont estimées à partir des valeurs de la littérature.

Il est possible d'intégrer directement les données de flux de rayonnement solaire mesurées (si disponible) ou en l'estimant à partir d'une latitude définie (équation 2.31). Dans les deux cas, une fonction d'albédo doit être définie de telle sorte que le rayonnement solaire puisse être calculé selon l'équation 2.32.

### 2.8.2.2 Calcul de l'évaporation

À partir des données climatiques intégrées au modèle, SEEP/W peut estimer l'évaporation. Le logiciel permet à l'utilisateur de définir sa méthode ou d'utiliser la méthode d'évapotranspiration selon la méthode Penman-Monteith ou Penman-Wilson (cf. section 2.4.1). Par l'estimation de l'évaporation, SEEP/W peut calculer le bilan hydrique dans des conditions climatiques changeantes dans le temps.

### 2.8.2.3 Données de neige

La quantité de neige au sol peut être calculée par SEEP/W à partir de plusieurs facteurs soit la densité de neige, l'ablation de neige, l'épaisseur de fonte de neige quotidienne et l'épaisseur de neige initiale. Des valeurs typiques pour ces paramètres sont directement indiquées par le logiciel. Les données de neige peuvent également être définies directement par l'utilisateur en intégrant des mesures réelles de terrain comme pour les données climatiques. L'équation utilisée est la suivante :

$$q_M = \frac{\Delta h_{neige} \rho_{neige}}{\Delta_t \rho_w} \quad (2.31)$$

Paramètre	Définition
$q_M$	Flux volumétrique associé à la fonte des neiges [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$\Delta h_{neige}$	Variation dans la hauteur de neige [m]
$\rho_{neige}$	Densité de la neige [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
$\Delta_t$	Incrément de temps [s]
$\rho_w$	Densité de l'eau liquide [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

## **CHAPITRE 3     MATERIEL ET MÉTHODE**

Sur un site en particulier, des essais en conditions réelles de terrain peuvent permettre d'étudier le fonctionnement d'une méthode de restauration afin de statuer de son efficacité. Ce suivi, effectué dans un contexte climatique actuel, peut aussi permettre de construire un modèle numérique afin d'évaluer l'évolution de la performance de la méthode de restauration dans un contexte de changements climatiques.

Ce chapitre s'attardera donc en premier lieu sur la présentation du site minier sur lequel la méthode de restauration testée est étudiée. Il sera ensuite présenté comment cette méthode est évaluée sur le terrain, ainsi qu'une description des matériaux étudiés et les résultats de leur caractérisation en laboratoire. Les données météorologiques présentes et futures utilisées pour le suivi de terrain et la modélisation numérique seront enfin détaillées.

### **3.1 Site à l'étude**

Le site Doyon-Westwood, propriété de la Corporation Iamgold, se situe à une quarantaine de kilomètres à l'est de la ville de Rouyn-Noranda (Québec). La mine d'or Doyon a été exploitée entre 1978 et 2010 (mine à ciel ouvert et souterraine). Les résidus générés par cette exploitation ont été déposés dans trois parcs à résidus. L'exploitation souterraine du gisement d'or Westwood, situé à 2 kilomètres à l'est de la mine Doyon, a débuté en 2014. La figure 3.1 présente les infrastructures du site minier.

Les parcs à résidus #2 et #3 sont ceinturés de digues de retenues peu perméables, permettant de maintenir le niveau de la nappe phréatique à la surface des résidus. Cette configuration a incité la compagnie minière à envisager la technique de restauration du recouvrement monocouche combinée à la nappe phréatique surélevée pour la restauration des parcs à résidus #2 et #3. La compagnie minière a également choisi de valoriser une partie de ses rejets en désulfurant les résidus et en les utilisant comme matériau de recouvrement.



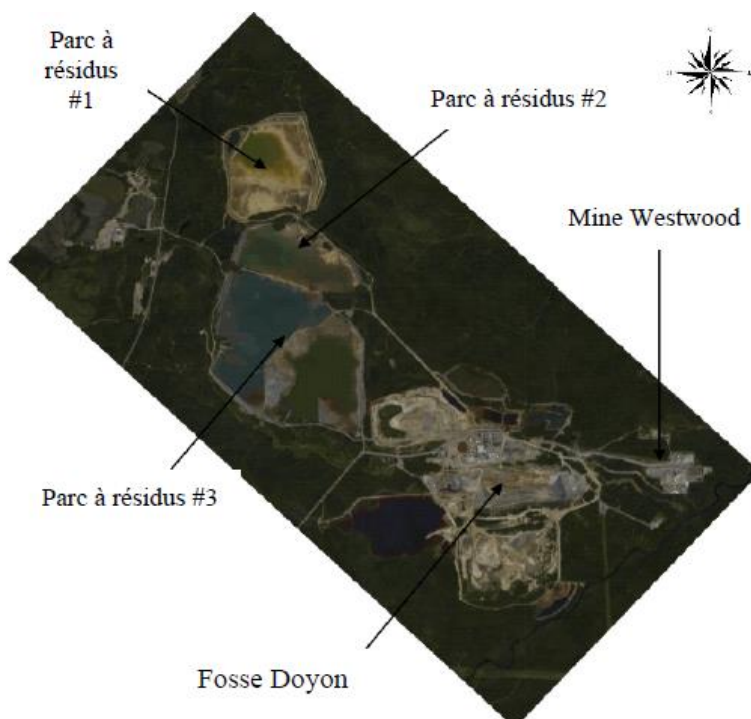


Figure 3.1 : Vue aérienne du site Doyon-Westwood (adapté de Rey et al., 2016)

Des essais en colonnes ont permis d'évaluer l'effet du niveau de la nappe phréatique, de la teneur résiduelle en sulfures et de l'épaisseur du recouvrement sur la performance de cette méthode de restauration appliquée à ce site (Demers, 2008; Demers et al., 2008a). Des rejets désulfurés de la mine Doyon ont été utilisés pour le recouvrement monocouche. Des simulations numériques subséquentes ont permis de proposer une configuration de la méthode de restauration, avec un recouvrement d'une épaisseur de 1 mètre, un contenu en sulfures jusqu'à 0,8%S et une nappe phréatique à l'interface recouvrement-résidus (Demers et al., 2008a).

Après la fermeture de la mine Doyon, les travaux réalisés sur les rejets désulfurés Doyon ont été poursuivis avec les rejets désulfurés Westwood, afin d'être utilisés comme matériel pour le recouvrement monocouche (Rey et al., 2017).

Afin de tester la méthode de restauration à l'échelle intermédiaire, trois cellules de terrains expérimentales ont été installées sur le site en 2015 (figure 3-2). Ces cellules visent à tester différentes configurations de la méthode de restauration (Rey et al., 2016). Dans le cadre de cette étude, il ne sera fait mention que des cellules #1 et #2.

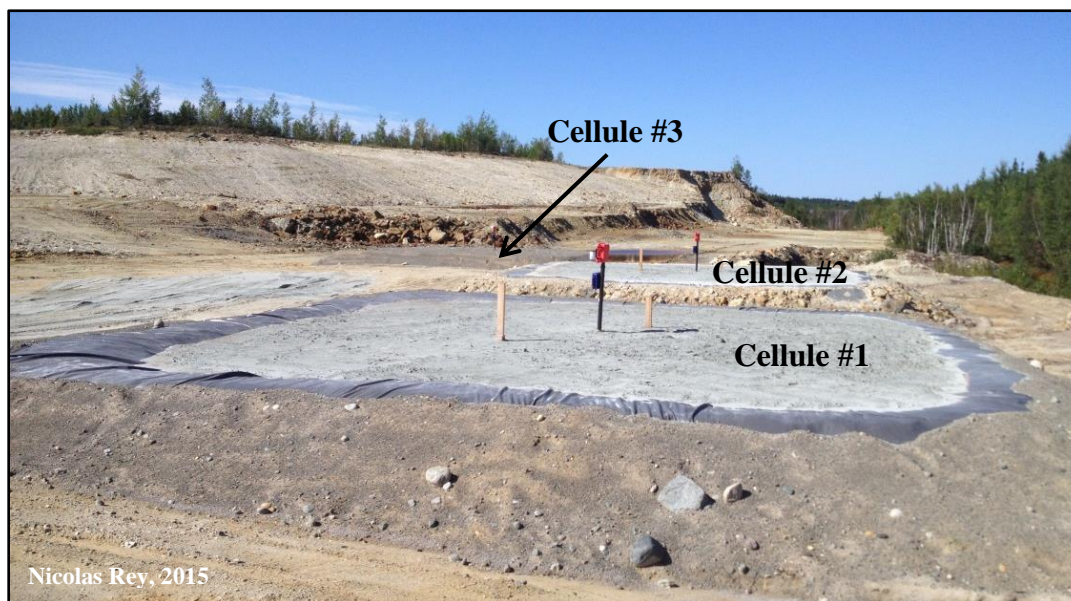


Figure 3.2 : Photographie des trois cellules expérimentales sur le site Doyon-Westwood

Les cellules de forme pyramidale inversée présentent à la base 1 m de résidus réactifs Doyon (figure 3-3). Le recouvrement monocouche constitué de résidus désulfurés est de 1 m pour les cellules #1 et #2. Des drains d'exfiltration équipés de débitmètres, qui sont des pluviomètres adaptés (de type NovaLynx 260-2520), connectés à des datalogger (Hobo UX90), sont installés à la base des cellules afin de mesurer les débits sortants et également afin d'échantillonner les lixiviats. Les drains sont installés à une profondeur de 1 m sous l'interface recouvrement-résidus pour la cellule #1 et à une profondeur de 2 m pour la cellule #2. Ces deux profondeurs ont pour objectif de permettre de maintenir le niveau de la nappe phréatique à des valeurs équivalentes à 0.5PEA (1 m) et à 1PEA (2 m) des résidus générateurs Doyon.

Les cellules ont été instrumentées afin de réaliser un suivi de différents paramètres sur plusieurs années (2015-2018). La teneur en eau volumique (TEV) est mesurée à des profondeurs de 10 cm sous la surface des résidus désulfurés, à 10 cm au-dessus de l'interface entre les deux types de résidus et 10 cm en-dessous cette même interface. La succion est mesurée à 10 cm au-dessus et 10 cm en-dessous de l'interface entre les deux types de résidus (Figure 3-3). Les appareils de mesures utilisés sont de type Decagon 5TM pour la mesure de la TEV et de type Watermark pour la mesure de la succion. La calibration des instruments de mesure a été effectuée lors de la construction des cellules (cf. Rey et al., 2016). La configuration et l'instrumentation des cellules sont présentées à la figure 3.3.

En 2018, le suivi des cellules de terrain a été réalisé par l’auteure sur les cellules #1 et #2; les résultats de ce suivi sont présentés à l’annexe A. Dans la suite de ces travaux, ce sont uniquement les résultats du suivi de la TEV qui seront utilisés.

L’analyse des résultats du suivi de la TEV pour les deux cellules ont montrés que le positionnement des drains n’a pas permis de maintenir le niveau de la nappe phréatique aux profondeurs souhaités de ½ PEA et 1 PEA. En réalité, de l’eau s’accumulait dans les cellules, ce qui maintenait le niveau de la nappe dans les résidus Doyon et non à la base ou à 1 m sous eux.

### **3.2 Caractérisation des matériaux**

Les cellules #1 et #2 sont constituées d’un mètre de résidus Doyon surmontés d’un mètre de résidus Goldex. Les résidus Doyon générateurs de DMA contiennent 2 à 4% de soufre, principalement sous forme de pyrite et ont un faible pouvoir neutralisant (Demers et al., 2008a; Rey et al., 2017). Ils ont été excavés sur le parc #3, où ils étaient maintenus saturés jusqu’à leur mise en place.

En 2015, le système de désulfuration des résidus de la mine Westwood n’était pas opérationnel et ne pouvait être en mesure de fournir un volume suffisant de rejets désulfurés pour la couche de recouvrement. Des résidus ayant des propriétés géochimiques similaires, produits de la mine Goldex (Val-d’Or, Agnico-Eagle), ont été utilisés. Les résidus ont été transportés par camion de la mine Goldex jusqu’au site par camion. Ces résidus contiennent 0,11% S (principalement sous forme de pyrite) et 0,6% C (Ethier, 2018; Rey et al., 2017).

Les matériaux utilisés ont été caractérisés dans les laboratoires de l’IRME lors de la construction des cellules. Les échantillons prélevés en 2015 ont été utilisés par l’auteure pour réalisés de nouveaux essais et ainsi les comparer aux résultats de 2015.

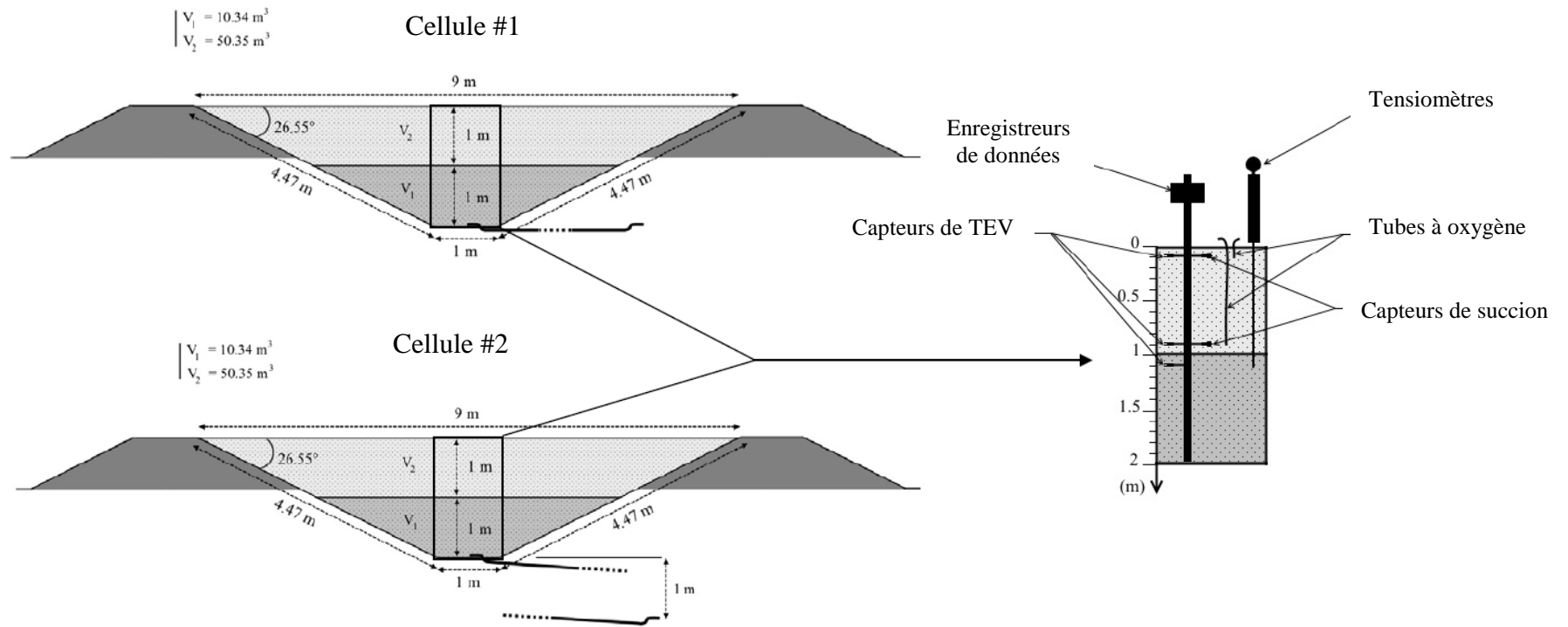


Figure 3.3 : Vue en coupe de la géométrie des cellules expérimentales #1 et #2 et de l'instrumentation en place (adapté de Rey et al., 2016)

### 3.2.1 Granulométrie

Les courbes granulométriques ont été obtenues par granulométrie à diffraction laser (Malvern, type Mastersizer). Cette technique consiste à mesurer l'intensité de la lumière diffusée lors du passage d'un faisceau laser à travers un échantillon de particules dispersées. Cette donnée est ensuite analysée par un logiciel pour calculer la distribution granulométrique qui a créé l'image de diffraction (Malvern Panalytical Ltd., 2019).

Les résultats des courbes granulométriques obtenus en 2015 sont présentés à la figure 3.4 (Rey et al., 2017). Ces différentes courbes granulométriques sont semblables à ce qui a déjà été mesuré pour des résidus miniers au Québec (Aubertin et al., 2002; Bussière, Aubertin, Mbonimpa, Molson et Chapuis, 2007). Ces essais ont cependant montré que la granulométrie du matériau Goldex est en fait plus grossière que celle souhaitée originalement (similaire à celle de Westwood).

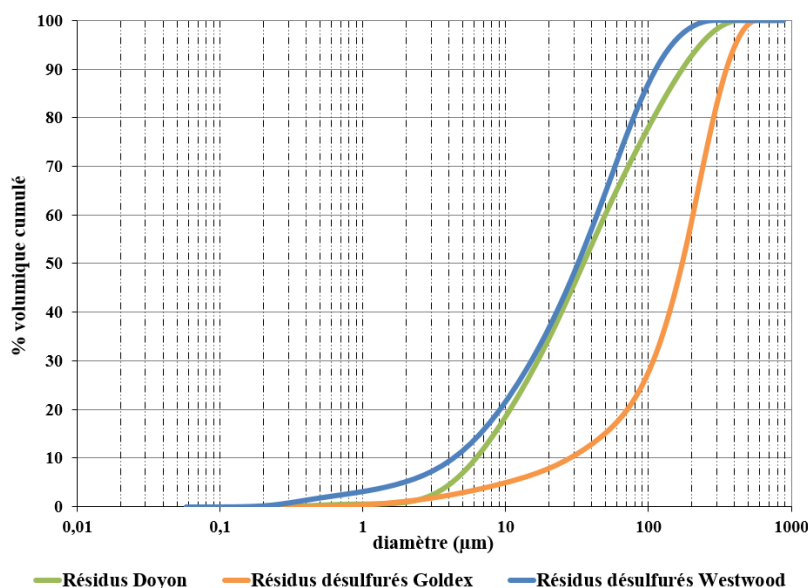


Figure 3.4 : Courbes granulométriques des résidus Doyon, Goldex et Westwood (d'après Rey et al., 2017)

Les courbes granulométriques permettent entre autres d'obtenir les valeurs de  $D_{10}$  et  $D_{60}$ , qui représentent les diamètres correspondant à un pourcentage passant cumulatif de 10% et 60%. Le coefficient d'uniformité ( $C_U = D_{60} / D_{10}$ ) est un indicateur de l'uniformité/étalement de la granulométrie du matériau étudié (tableau 3.1).

### 3.2.2 Densité relative des grains

La densité relative des grains ( $G_s$ ) a été obtenue par pycnomètre à hélium (Quantachrome Instruments, UltraPyc 1200e). Cette méthode utilise le principe du déplacement des fluides d'Archimède et la loi de Boyle sur la dilatation des gaz, afin de déterminer la densité d'un matériel solide (ASTM D5550-14). Les résultats obtenus en 2015 sont présentés au tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Paramètres granulométriques et densité relative des grains des résidus étudiés

Paramètres/ Résidus	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)	C <sub>u</sub> (-)	G <sub>s</sub> (-)
Doyon	$6,18 \times 10^{-3}$	$4,96 \times 10^{-2}$	8,03	2,84
Goldex	$2,8 \times 10^{-2}$	$2,05 \times 10^{-1}$	7,32	2,72
Westwood	$4,29 \times 10^{-3}$	$4,36 \times 10^{-2}$	10,17	2,79

### 3.2.3 Porosité et indice des vides

L'indice des vides ( $e$ ) a été mesuré sur le terrain par la méthode dite de l'anneau volumique. Un échantillon de sol non remanié est prélevé dans un anneau métallique de volume connu. La masse, la teneur en eau massique de l'échantillon, ainsi que la densité relative des grains sont ensuite mesurées, ce qui permet de déduire l'indice des vides ( $e$ ) du matériau et son poids volumique en place. Cette méthode permet également de mesurer la porosité in-situ ( $n$ ) des matériaux.

Une série d'essais, soit deux essais par matériau et par couches (pour le résidu désulfuré Goldex) ont été réalisés, lors de la construction des cellules de terrain en 2015. Les résultats de ces essais pour les cellules #1 et #2 sont présentées à l'annexe B. La porosité moyenne est de 0.31 pour le résidu Goldex et de 0.33 pour le résidu Doyon. La moyenne de l'indice des vides est de 0.45 pour le résidu Goldex et de 0.48 pour le résidu Doyon.

### 3.2.4 Conductivité hydraulique saturée

La conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ) des matériaux a été déterminée au moyen de perméamètres à parois rigides à charges variables (ASTM D5856-15). Les valeurs mesurées ont été comparées aux valeurs prédites par le modèle de Kozeny-Carman modifié (KCM; Mbonimpa et Aubertin, 2002). En 2015, deux essais ont été réalisés sur les résidus Doyon et Westwood et trois essais sur le matériau Goldex. En 2017, deux essais ont été réalisés sur le matériau Doyon et un

essai sur le matériau Westwood. Il n'y avait plus assez de matériau Goldex pour réaliser de nouveaux essais. Les résultats de ces essais sont présentés au tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Résultats des conductivités hydrauliques saturées (mesurée) et prédites (modèle KCM) des résidus étudiés.

			2015			2017	
Résidus			Doyon	Goldex	Westwood	Doyon	Westwood
Essai #1	Porosité (-)		0,46	0,49	0,47	0,38	0,42
	$k_{sat}$ ( $m.s^{-1}$ )	Mesurée	8,7x10 <sup>-6</sup>	3,4x10 <sup>-6</sup>	2,2x10 <sup>-6</sup>	8,3x10 <sup>-7</sup>	1,7x10 <sup>-7</sup>
		Prédite	1,9x10 <sup>-6</sup>	6,6x10 <sup>-5</sup>	9,3x10 <sup>-7</sup>	3,9x10 <sup>-7</sup>	4,6x10 <sup>-7</sup>
Essai #2	Porosité (-)		0,41	0,49	0,42	0,38	-
	$k_{sat}$ ( $m.s^{-1}$ )	Mesurée	1,4x10 <sup>-6</sup>	4,0x10 <sup>-6</sup>	4,8x10 <sup>-7</sup>	1,0x10 <sup>-6</sup>	-
		Prédite	7,7x10 <sup>-7</sup>	6,6x10 <sup>-5</sup>	4,2x10 <sup>-7</sup>	3,9x10 <sup>-7</sup>	-
Essai #3	Porosité (-)		-	0,49	-	-	-
	$k_{sat}$ ( $m.s^{-1}$ )	Mesurée	-	5,9x10 <sup>-6</sup>	-	-	-
		Prédite	-	6,6x10 <sup>-5</sup>	-	-	-
$k_{sat}$ ( $m.s^{-1}$ ) Moyenne arithmétique Valeurs mesurées			5,0 x10 <sup>-6</sup>	4,4x10 <sup>-6</sup>	1,3x10 <sup>-6</sup>	9,3x10 <sup>-7</sup>	1,7x10 <sup>-7</sup>

La figure 3.5 permet de comparer les résultats de 2015 et 2017 pour les matériaux Doyon et Westwood, ainsi que les résultats de 2015 pour le matériau Goldex.

Pour les matériaux Doyon et Westwood, la comparaison entre les valeurs mesurées et celles prédites permet de montrer que les résultats sont toujours à l'intérieur d'une marge d'erreur de  $\pm 5$  fois la valeur prédite. Cependant, tous les résultats des essais surestiment légèrement les valeurs prédites. Les mesures effectuées sur le matériau Goldex sous-estiment d'un ordre de grandeur ( $10^{-6}$  au lieu de  $10^{-5}$ ) les valeurs prédites par le modèle KCM. Comme il n'a pas été possible de refaire les essais en 2017, la valeur prédite a été utilisée pour le matériel Goldex pour la suite de ces travaux.

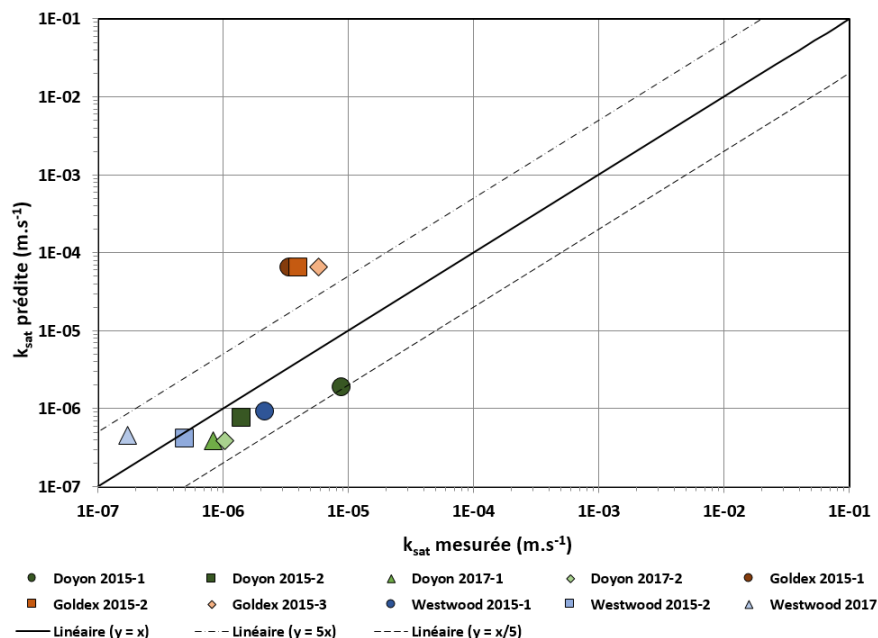


Figure 3.5 : Comparaison entre les conductivités hydrauliques saturées mesurées et prédites pour les résidus étudiés

### 3.2.5 Courbes de rétention d'eau

La courbe de rétention d'eau (CRE) a été déterminée à partir d'essais réalisés en cellules Tempe (ASTM D6836-16). Ces essais permettent d'obtenir l'évolution de la teneur en eau volumique du matériau en fonction de la pression appliquée. Les résultats de ces essais peuvent être intégrés au logiciel RETC pour obtenir selon différents modèles une courbe descriptive. Le modèle de van Genuchten (1980) a été utilisé ici.

Des nouveaux essais en cellules Tempe ont été réalisés en 2017 sur les trois matériaux. Deux essais ont été réalisés sur le résidu Doyon et un essai pour les résidus Goldex et Westwood respectivement. Le tableau 3.3 présente les paramètres de van Genuchten (1980) obtenus. La pression d'entrée d'air (PEA) de chaque matériau a été déterminée sur cette courbe en utilisant la méthode des deux tangentes (Fredlund et Xing, 1994).



Tableau 3.3 : Paramètres de van Genuchten (1980) des CRE des résidus étudiés.

Paramètres/ Résidus	$\theta_s(-)$	$\theta_r(-)$	$\alpha_{vG} (m^{-1})$	$n_{vG} (m^{-1})$	$k_{sat}(m.s^{-1})$	PEA (m)
<b>Doyon 2015</b>	0.39	0.05	0.4	1.97	$5.9 \times 10^{-7}$	1.2
<b>Doyon 2017-1</b>	0.36	0.05	0.26	2.13	$2.7 \times 10^{-7}$	1.8
<b>Doyon 2017-2</b>	0.37	0.02	0.19	2.64	$3.3 \times 10^{-7}$	2.7
<b>Goldex 2015-1</b>	0.41	0.02	0.87	3	$1.4 \times 10^{-6}$	0.6
<b>Goldex 2015-2</b>	0.41	0.02	0.62	2.44	$1.4 \times 10^{-6}$	0.8
<b>Goldex 2017</b>	0.4	0.01	0.73	2.43	$1.2 \times 10^{-5}$	0.7
<b>Westwood 2015-1</b>	0.41	0.07	0.13	2.73	$3.2 \times 10^{-7}$	4.2
<b>Westwood 2015-2</b>	0.41	0.07	0.21	2.05	$3.2 \times 10^{-7}$	2.3
<b>Westwood 2017</b>	0.41	0.08	0.16	2.18	$3.7 \times 10^{-7}$	2.8

La figure 3.6 présente pour chaque matériau les résultats des essais et les différentes courbes de rétention d'eau selon le modèle de van Genuchten (1980) et MK. Pour l'ensemble des matériaux, les résultats des essais de 2017 sont comparables à ceux réalisés en 2015. Les CRE sont assez proches les unes des autres et sont typiques des valeurs obtenues généralement pour des résidus (Aubertin, Mbonimpa, Bussière et Chapuis, 2003b; Bussière, 2007). Le modèle MK semble moins bien représenter les valeurs expérimentales du matériau Goldex, et les valeurs obtenues à succion supérieure à 10 kPa pour les matériaux Westwood et Doyon. Les pressions d'entrées d'air obtenues par la méthode des tangentes varient de 1.2 m à 2.7 m pour le matériau Doyon, de 2.3 m à 4.2 m pour le matériau Westwood et de 0.6 à 0.8 m pour le matériau Goldex qui est plus grossier que les deux autres.

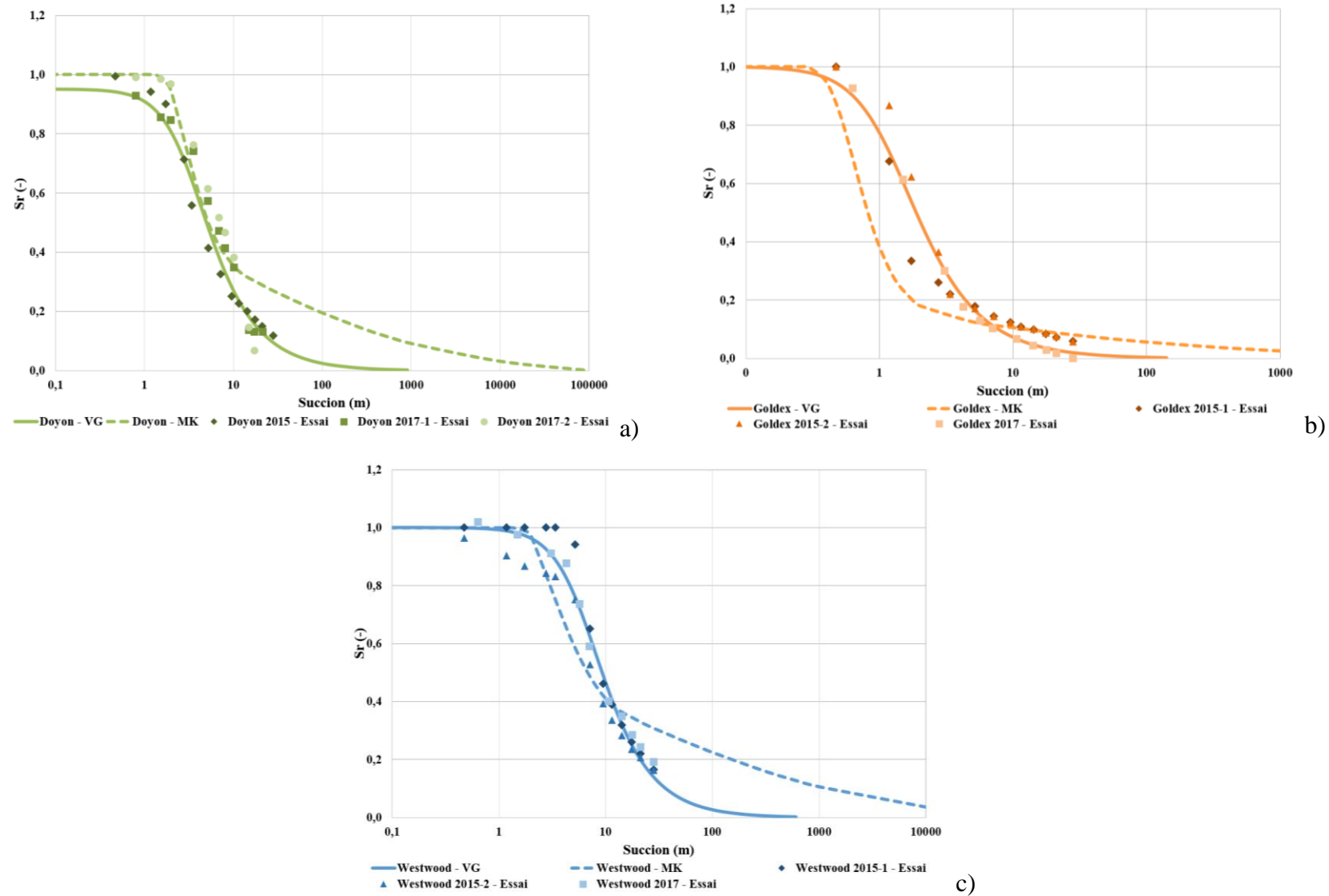
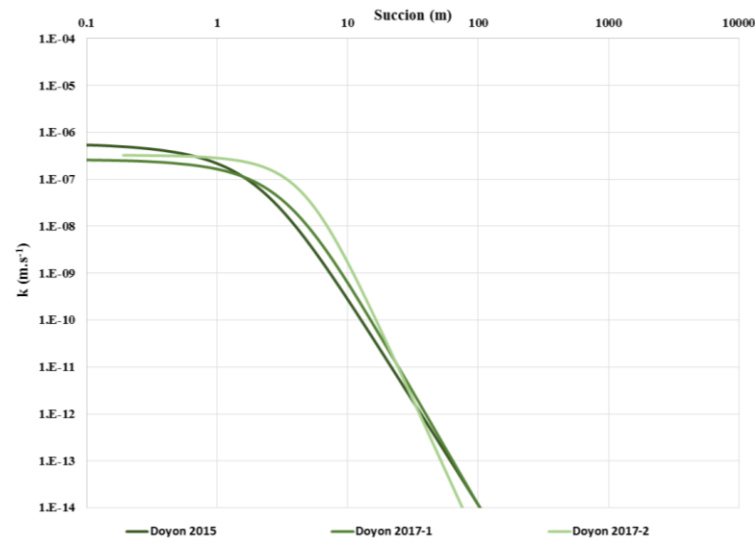


Figure 3.6 : Résultats des essais réalisées en cellule Tempe et courbes de rétention d'eau selon le modèle de van Genuchten (1980) et MK pour les matériaux a) Doyon, b) Goldex et c) Westwood.

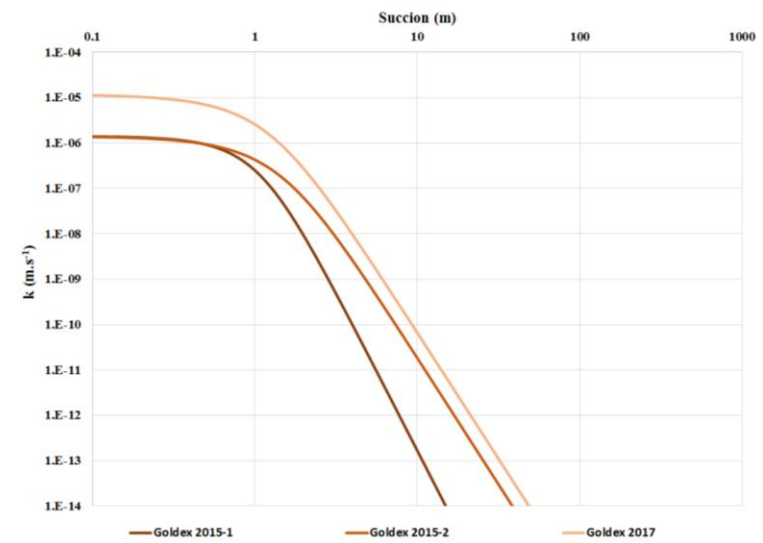
### 3.2.6 Fonctions de perméabilité

À partir des CRE et des valeurs de  $k_{sat}$ , il est possible d'obtenir les fonctions de perméabilités des matériaux. La figure 3.7 présente les fonctions de perméabilité pour l'ensemble des essais réalisés en 2015 et 2017 obtenus selon le modèle de Mualem (1976). La valeur minimale est volontairement imposée à  $10^{-14}$ , car il n'est pas possible d'une part d'obtenir expérimentalement des résultats inférieurs à cette valeur et de plus cela permet d'éviter certaines problématiques de résolution de certaines équations (Fredlund, Xing et Huang, 1994; Mbonimpa et al., 2006).

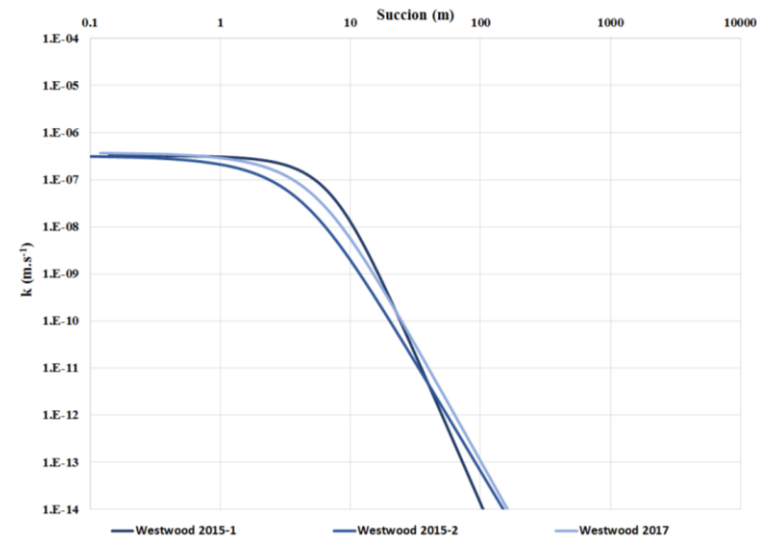
Comme pour les courbes de rétention d'eau, pour chaque type de matériau, les résultats sont comparables entre les essais de 2015 et 2017, exception faite du matériau Goldex. Comme les valeurs de la conductivité hydraulique, mesurées en laboratoire en 2015 pour ce matériel, étaient plus faibles que les valeurs prédites ( $10^{-6}$  au lieu de  $10^{-5}$ ), on observe par conséquent une différence entre les résultats de 2015 et le résultat de 2017. Rappelons que, comme la conductivité hydraulique saturée n'a pas été mesurée en 2017, la valeur utilisée pour ce matériel est celle prédite selon le modèle KCM.



a)



b)



c)

Figure 3.7 : Fonctions de perméabilités obtenu à partir des essais en cellule Tempe pour les matériaux  
a) Doyon, b) Goldex et c) Westwood.

### **3.3 Données climatiques**

#### **3.3.1 Données météorologiques actuelles**

Les données météorologiques utilisées dans le cadre de ces travaux proviennent d'Environnement et Changements Climatiques Canada (ECCC) pour la station « Rouyn-Noranda Aéroport » (station n° 50090), située à une vingtaine de kilomètres au sud-ouest du site minier. Ces données sont la température de surface moyenne (au niveau du sol), les précipitations (liquides et solides), l'humidité relative et la vitesse du vent (au niveau du sol). Les données horaires ont été téléchargées pour toute la durée du suivi sur le terrain, soit de 2015 à 2018. À partir de ces données, les moyennes journalières ont été calculées et sont présentées à l'annexe C.

Les données météorologiques pour une station ne sont pas toujours complètes. Il a donc été nécessaire de combler les données manquantes afin de pouvoir les utiliser pour les simulations numériques avec SEEP/W. Dans le cas de la série de données utilisées, moins de 2% des données étaient indisponibles pour chacune des quatre variables météorologiques. Dans le cas des températures, il est possible de faire une interpolation linéaire. Cependant, pour les autres données, cette méthode n'est pas applicable à cause de la variabilité naturelle non linéaire de ces données. Afin d'utiliser des données le plus proche de la réalité, il a été décidé d'utiliser pour les quatre variables des données provenant d'autres stations environnantes, selon leur disponibilité. Les autres stations utilisées sont celles de Mont-Brun (5988), Val-d'Or Aéroport (50720) et Val-d'Or (30172). L'utilisation de la station de Mont-Brun a été privilégiée du fait de sa plus grande proximité avec le site à l'étude (20 km au nord-ouest). Quand les données pour cette station n'étaient pas disponibles les stations de Val-d'Or ou Val-d'Or Aéroport ont été utilisées selon la disponibilité des données. Les données utilisées sont soit les valeurs journalières soit des moyennes calculées à partir des valeurs horaires. Les différentes provenances des données manquantes sont identifiées à l'annexe C.

#### **3.3.2 Scénarios climatiques d'ici la fin du siècle pour le site Doyon-Westwood**

Rappelons que ces travaux de maîtrise s'intègrent dans un projet FRQNT ayant pour but le développement d'une approche méthodologique permettant d'intégrer les changements climatiques aux études de performance des méthodes de restauration. Dans le cadre de ce projet, le

mandat a été donné à une étudiante en post-doctorat de déterminer les conditions moyennes et extrêmes jusqu'en 2100, intégrant les changements climatiques, entre autres pour le site Doyon-Westwood (Bresson, 2019; à paraître). Les séries temporelles des mêmes variables météorologiques détaillées précédemment sont utilisées pour la modélisation climatique.

### 3.3.2.1 Données météorologiques actuelles

Afin d'effectuer des scénarios climatiques dans une région donnée, une station d'observation de surface d'ECCC doit être sélectionnée. Cette station doit présenter un enregistrement de toutes les données météorologiques décrites précédemment et ce en continu sur une longue période de temps (Bresson, 2019; à paraître).

Pour le site de Doyon-Westwood, c'est la station de Val-d'Or Aéroport, située à une soixantaine de kilomètres à l'est du site, qui a été sélectionnée (figure 3.8). La station de Rouyn-Noranda utilisée pour la période de suivi des cellules de 2015 à 2018 ne présente pas les critères de sélection requis et a donc dû être écartée pour effectuer les scénarios climatiques. Pour l'ensemble des paramètres mentionnés précédemment ce sont des données journalières qui ont été utilisés (Bresson, 2019; à paraître).

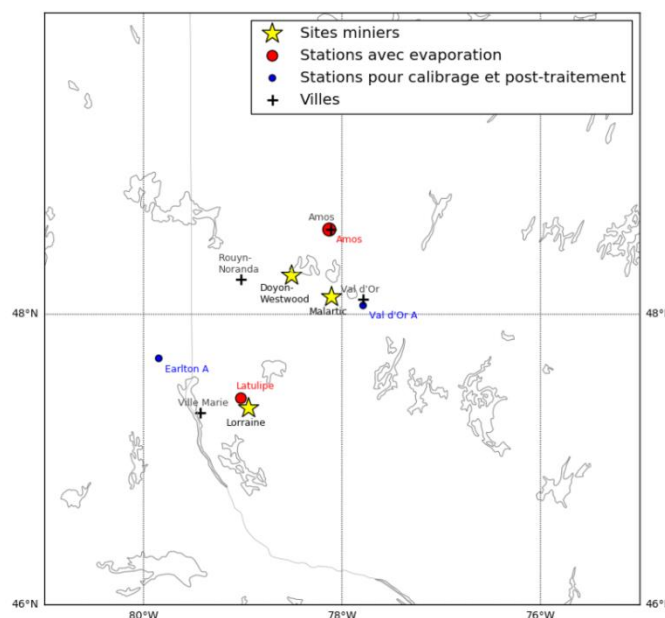


Figure 3.8 : Localisation des principales villes, sites miniers étudiés, stations météorologiques utilisées dans le cadre du projet FRQNT (Bresson, 2019; à paraître).

Les variables météorologiques sont enregistrées selon différentes échelles de temps dépendamment de la variable, qui peuvent être horaires, journalières ou mensuelles. Un traitement peut donc être nécessaire pour présenter l'ensemble de ces données selon l'échelle journalière (Bresson, 2019; à paraître). Les données journalières d'humidité relative et de vitesse du vent sont calculées à partir des données horaires, en faisant la moyenne des valeurs sur les 24h de chaque journée. Si plus de 2h de données manquent sur la journée, l'observation est considérée comme absente. Ce critère permet de considérer uniquement les journées qui présentent 90% ou plus de données (Bresson, 2019; à paraître).

Pour les données de température et d'humidité relative manquantes, une interpolation linéaire peut être effectuée afin de combler les données manquantes. Lorsque les données sont absentes pour plus de quatre jours consécutifs, l'interpolation a également été effectuée, mais le résultat dans ce cas risque d'être plus éloigné de la réalité. Pour les précipitations et la vitesse du vent, l'interpolation linéaire ne peut pas s'appliquer et il n'est pas possible d'estimer de manière réaliste les données manquantes. Dans ce cas les données sont considérées comme absentes (Bresson, 2019; à paraître).

### **3.3.2.2 Scénarios climatiques pour la région de Val-d'Or**

Neuf modèles climatiques globaux et régionaux ont été sélectionnés parmi ceux disponibles dans les projets CMIP5 et CORDEX « Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment ». Deux scénarios radiatifs soit le RCP4.5 et RCP8.5 ont été utilisés (tableau 3.4). Un total de dix-huit simulations a alors été obtenu. La technique de post-traitement appliqué sur ces résultats est la méthode quantile-quantile (cf. section 2.6.3).

Les graphiques de la figure 3.9 présentent pour la station de Val-d'Or Aéroport les résultats des simulations climatiques obtenues à partir de l'ensemble des modèles utilisés, soit l'évolution de 1950 à 2100 de : la température moyenne et des précipitations moyennes annuelles (figure 3.9). La couleur bleue correspond au scénario radiatif RCP 4.5 et le rouge au RCP 8.5. Les enveloppes représentent les maximums et minimums obtenus pour l'ensemble des simulations climatiques issus des neuf modèles climatiques. La moyenne de ces valeurs est alors représentée par les courbes pleines.

Tableau 3.4 : Liste des modèles climatiques utilisés pour obtenir les différentes simulations à la station de Val-d'Or Aéroport (adapté de Bresson, 2019; à paraître).

Modèle	Pays	Échelle	RCP
CanESM2	Canada	Global	4.5
			8.5
IPSL-CM5A-LR	France		4.5
			8.5
IPSL-CM5A-MR			4.5
			8.5
IPSL-CM5B-LR			4.5
			8.5
MIROC-ESM	Japon		4.5
			8.5
GFDL-ESM2G	États-Unis		4.5
			8.5
GFDL-ESM2M		4.5	
		8.5	
CanRCM4/NAM-22_CCCma-CanESM2	Canada	Régional	4.5
			8.5
RCA4/NAM-44_CCCma-CanESM2	Suède		4.5
			8.5

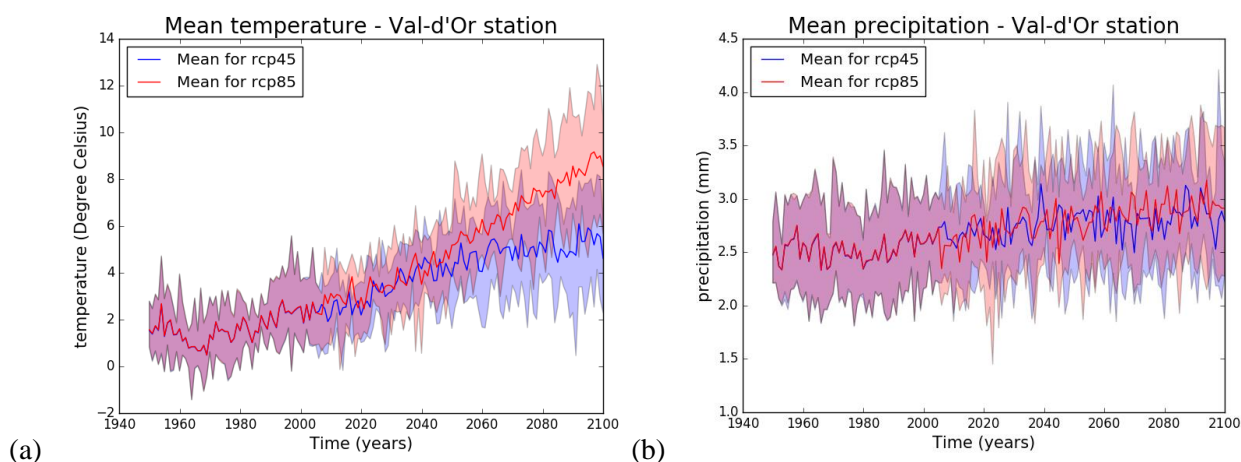


Figure 3.9 : Évolution des paramètres climatiques pour la station de Val-d'Or de 1940 à 2100 : a) température moyenne, b) précipitations moyennes annuelles (Bresson, 2019; à paraître).

Parmi les différentes simulations obtenues, une sélection est faite en fonction des besoins spécifiques au projet de recherche. Pour effectuer cette sélection, les simulations sont comparées en fonction de la variation de température ( $\Delta T$ ) par rapport à la température actuelle, par exemple  $+6^{\circ}\text{C}$ , et en fonction de la variation de précipitations ( $\Delta \text{Pr}$ ) par rapport aux précipitations actuelles, par exemple  $+10\%$  (figure 3.10).



Dans le cadre de ces travaux de recherche, les résultats de trois simulations climatiques ont été utilisés. La simulation la plus pessimiste pour la performance de la méthode de restauration présente une variation de précipitation faible combinée à une variation de température élevée (IPSL-CM5A-MR\_RCP8.5). La seconde simulation utilisée correspond à un autre extrême, soit une variation importante des précipitations (GFDL-ESM2G\_RCP4.5). La dernière simulation utilisée présente des variations moyennes par rapport aux deux autres simulations (CanESM2\_RCP 4.5). Ces trois simulations climatiques sélectionnées sont identifiées en rouge sur la figure 3.10.

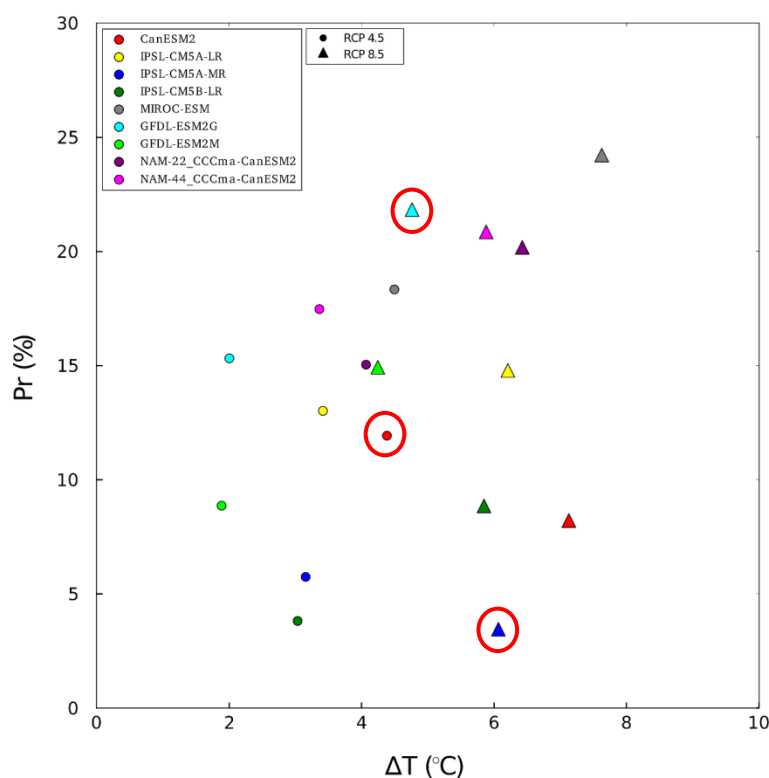


Figure 3.10 : Diagramme de dispersion des différents scénarios climatiques pour la station Val-d'Or Aéroport (adapté deBresson, 2019; à paraître).

Les valeurs moyennes de variation de températures ( $\Delta T$ ) et de précipitations ( $\Delta Pr$ ) des trois simulations climatiques sélectionnées sont présentées au tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Variations moyennes des températures et des précipitations des simulations climatiques sélectionnées.

Nom Modèle	RCP	$\Delta T$ (°C)	$\Delta Pr$ (%)
IPSL-CM5A-MR	8.5	6.1	3.5
CanESM2	4.5	4.4	11.9
GFDL-ESM2G	8.5	4.8	21.8

Les données journalières de 2020 à 2100 des variables météorologiques (température, précipitations, humidité relative et vitesse du vent) obtenues pour les trois simulations sélectionnées sont présentées à l'annexe D. Ces données ont été intégrées au modèle numérique afin d'analyser la performance de la méthode de restauration selon ces différentes simulations climatiques.

### 3.3.2.3 Données complémentaires

Le rayonnement solaire permet d'estimer le rayonnement à partir de la latitude du projet, qui est de  $48.25^\circ$  pour le site Doyon-Westwood et de la date de début de la simulation (ici le 24 juillet 2015, pour le début du suivi des cellules de terrain et 24 juillet 2020 pour les simulations climatiques). Les valeurs de l'albédo choisies sont respectivement de 0,8, 0,5 et 0,1 selon la présence de neige fraîche, ancienne ou un sol nul respectivement (Villeneuve et Richard, 2007).

En ce qui concerne les données de neige, les paramètres moyens indiqués directement par le logiciel SEEP/W (Geo-Slope International Ltd., 2017) ont été utilisé soit : densité de neige =  $100 \text{ kg/m}^3$ , ablation de neige = 0.55, épaisseur de fonte de neige quotidienne = 0,03 m et épaisseur de neige initiale = 0 (au 24 juillet).

## **CHAPITRE 4    ARTICLE 1: EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON THE PERFORMANCE OF A MONOLAYER COVER COMBINED WITH AN ELEVATED WATER TABLE TO PREVENT ACID MINE DRAINAGE**

Cet article de conférence a été présenté par l’auteure lors de la 71e Conférence canadienne de géotechnique, qui a eu lieu du 23 au 26 septembre 2018, à Edmonton (Alberta, Canada). Il présente les résultats préliminaires obtenus avec les modélisations numériques des cellules de terrain réalisés en considérant des changements climatiques simplifiés. Les co-auteurs de cet article sont Isabelle Demers, Thomas Pabst et Émilie Bresson de l’IRME. La version présentée ici prend en compte les recommandations du jury.

### **4.1 Abstract**

The chemical reaction of sulfides contained in mine tailings with water and oxygen can generate acid mine drainage (AMD). Reclamation methods must be considered, such as monolayer cover combined with elevated water table (EWT). This method consists in maintaining the tailings close to saturation, which limits the flow of oxygen and AMD generation. The performance of the technique is strongly related to precipitations that can influence the water table position within the tailings. In the context of climate change, the evolution of the future precipitation regime must be considered to ensure the efficiency of the reclamation over the long term. A monolayer cover combined with a EWT is considered to reclaim the Doyon-Westwood (Québec) mine site tailing ponds. Experimental cells installed on the site since 2015 were simulated numerically to evaluate the performance of the method. Average annual weather conditions up to year 2100 and extreme drought events were then incorporated into the model.

### **4.2 Résumé**

La réaction chimique des sulfures contenus dans les rejets miniers avec l’eau et l’oxygène est responsable du drainage minier acide (DMA). Une méthode de restauration comme la technique du recouvrement monocouche avec nappe phréatique surélevée (NPS), doit alors être envisagée. Cette méthode, permettant de maintenir les résidus saturés, limite le flux d’oxygène et ralentit fortement la génération de DMA. L’efficacité de cette méthode est liée aux précipitations qui vont influencer le niveau de la NPS. Dans un contexte de changements climatiques, il est important

d'intégrer l'évolution du régime des précipitations futures afin de s'assurer de l'efficacité de la technique sur le long terme. Cette méthode de restauration sera mise en place au site minier Doyon-Westwood (Québec). Afin d'évaluer la performance de la méthode, une modélisation numérique de cellules expérimentales, présentes sur le site depuis 2015, est réalisée. Les conditions climatiques annuelles moyennes jusqu'en 2100 et les événements de sécheresse extrêmes sont intégrés au modèle.

### 4.3 Introduction

Gold and base metals are often associated with sulphide minerals. Mining operations generate various waste materials that can contain significant concentrations of sulphides. These sulphides can chemically react with oxygen and water. The products of this reaction, called acid mining drainage (AMD), are characterized by low pH and high concentrations of dissolved metals and sulphates (Blowes et al., 2014; Nordstrom et al., 2015).

Tailings are produced during ore processing and are usually stored in tailings ponds. Reclamation is required to limit AMD generation from sulphidic tailings. Reclamation methods usually aim to limit the chemical reactions involving sulphides, oxygen and water, and act as a barrier limiting the access towards the tailings of one of the two main reagents (oxygen or water).

Oxygen barriers are often suggested in temperate climates. Water covers (MEND, 2001) are an efficient oxygen barrier. Indeed, the oxygen diffusion coefficient ( $D_e$ ) in water is 10000 times lower than in air (Aachib et al., 2004). The concentration of oxygen migrating towards the tailings is therefore strongly limited. Although efficient, technique water cover presents geotechnical instability risks of the containment infrastructures (Aubertin et al., 2011; Aubertin et al., 2016; Aubertin et al., 1997).

An alternative method using this concept is the monolayer cover combined with elevated water table (EWT). This reclamation method associates two techniques, which taken together can enhance the efficiency of the method. This method consists of maintaining the water table level at an optimal depth within the tailing ponds by the control of the water budget and the capillary rise (Cosset, 2009; Dagenais, 2005; Dagenais et al., 2006; Demers, 2008; Demers et al., 2007; Ethier et al., 2014; Ethier et al., 2013; Ethier et al., 2018; Ouangrawa, 2007; Ouangrawa et al., 2010; Ouangrawa et al., 2009; Ouangrawa et al., 2006; Pabst et al., 2014; Senes, 1996). In a material

close to full water saturation, the oxygen flow is proportional to  $D_e$  and varies according the degree of saturation ( $S_r$ ), and becomes similar to the  $D_e$  of a water cover at a degree of saturation above 85% (Dagenais, 2005). Because of the capillary rise, a thickness of tailings situated over the water table stays close to saturation (Cosset, 2009). The finer the material is, the more important the capillary rise will be. The particle size distribution of typical tailings is similar to that of a silt (Aubertin et al., 2002), which facilitates the implementation of the EWT in tailings. The height of the capillary rise is relative to the air enter value (AEV) of the material, which can be determined by the water retention curve (WRC).

The monolayer cover, placed on the surface of tailings, can facilitate the rise of the water table in the tailings. A cover made of a relatively coarse-grained material allows to reduce evaporation from the tailings and to favor infiltration (Dagenais et al., 2006; Ouangrawa et al., 2010; Ouangrawa et al., 2009). In the case of a cover material as fine as or finer than the tailings, the cover material can make use of its own capillary rise to maintain an elevated water table level (Ethier et al., 2014; Ethier et al., 2013; Ethier et al., 2018; Nicholson et al., 1988). Finally, the use of weakly reactive or desulfurized tailings (i.e. non-acid generating) as cover material can provide an oxygen sink by consumption through oxidation, and decrease the oxygen concentration which could migrate towards the tailings (Demers et al., 2007; Demers et al., 2009; Dobchuk et al., 2013; Mbonimpa et al., 2003; Romano et al., 2003; Sjöberg et al., 2001).

The performance of the technique is strongly related to the amount of precipitation that will influence the water budget, and particularly the water table level within the tailing ponds. In the context of climate change, it is important to integrate the evolution of the future precipitation regime in the design of cover systems to ensure the efficiency of the technique limit AMD over the long term. While the increase of precipitation would have a positive impact on this technique, it is the drought events that would be an issue. To represent the conditions of extreme drought, most of the studies used a period of two months without precipitation (Bussière, 1999). Although this period seems realistic, for temperate climate such as the one is the province of Quebec, it comes from no systematic analysis of meteorological data. In a context of climate change, this approach could underestimate intensity and period of drought, as well as its effect on cover performance. A new approach is being prepared to take adequately these changes into account (Bresson et al., 2018) and will be used in this study to evaluate the impact of climate change on the performance of a monolayer cover with EWT.

## **4.4 Site description**

### **4.4.1 Location and previous investigation**

The Doyon-Westwood site, property of Iamgold Corp., is located approximately forty kilometers east of Rouyn-Noranda (Quebec). Gold from the Doyon deposit has been mined and processed between 1978 and 2010. The tailings generated by this operation were stored in tailings ponds. These tailings contain 2 to 4% sulphides, mainly as pyrite, and a low neutralization potential; therefore they are acid-generating. Underground mining of the Westwood deposit, located to two kilometers at the east of the Doyon mine, began in 2014.

The reclamation method initially chosen for tailings ponds #2 and #3 was a water cover. The capacity of pond #2 having more quickly been reached than planned, the operator tried to find an alternative reclamation method that could provide or increase the capacity. A monolayer cover made of desulfurized tailings, combined with EWT, having several advantages in this case, was selected as an alternative reclamation method. First, it provided storage for desulfurized tailings. Second, it allowed to improve the geotechnical stability of dikes, the interstitial pressure exerted on dikes decreasing by lowering the phreatic surface (Demers, 2008). Furthermore, this method also allowed to study the possibility of using desulfurized tailings as cover material, as expressed by the «integrated tailings management» approach (Bussière et al., 1995). This approach encourages the re-use of acid-generating tailings and reduces the volume of tailings to store in the ponds (Benzaazoua et al., 2008).

The reclamation method was first tested in laboratory with experimental columns to test various parameters such as water level, residual sulphide content of tailings used as cover, and cover thickness (Demers et al., 2007). This investigation allowed demonstrating the efficiency of the method. The subsequent numerical modelling allowed to determine a configuration of the cover as being one meter thick, containing 0.8% of sulphide and with a water level located at the interface between Doyon tailings and the cover (Demers, 2008; Demers et al., 2007).

#### 4.4.2 Experimental field cells

Although the closure of the Doyon mine occurred before reclamation of Ponds #2 and #3 began, the «integrated tailings management» concept was maintained with the commissioning of the Westwood mine, which uses the Doyon mineral processing facilities. The performance of a monolayer cover made of desulfurized tailings coupled with an EWT was therefore further tested. To assess the reclamation method in the field, three experimental cells, with different configurations (one being shown in Figure 4.1), were installed on the site in 2015 (Rey et al., 2016).

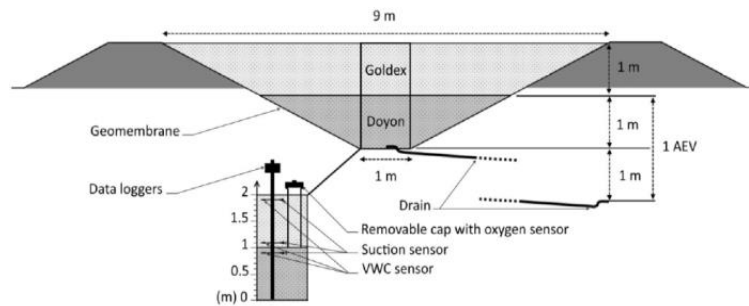


Figure 4.1 : Configuration and instrumentation of field cell #1 (Rey et al., 2017)

The cells are shaped as truncated inverted pyramids. Cell #1 is filled with one meter of sulphidic Doyon tailings and the cover of the desulfurized tailings is one meter thick (Rey et al., 2016). During the implementation of cells, the Westwood treatment plant was not yet operational, so a similar material, from the Goldex mine (Val-d'Or, Agnico Eagle Mines Ltd), was used as a replacement for the cover material.

Drains equipped with flowmeters were installed on the base of cells to set the water table level. The drains were located 1 meter below the cover-tailings interface for cell #1, theoretically equivalent to  $\frac{1}{2}$  AEV of the Doyon tailings.

Cells were also instrumented to monitor various parameters over several years (2015-2017), such as the volumetric water content (VWC) measured with Decagon 5TM sensors and suction with Watermark sensors (Figure 4.1). Probes were installed 10 cm below the surface of the desulfurized tailings, 10 cm above the cover-tailings interface and 10 cm below this interface.

### 4.4.3 Climate change projections for Abitibi region

In Quebec, important variations of temperatures and annual average precipitation are expected within the next century. Also, this region should expect an increase in the frequency and intensity of extreme events (Desjarlais and Blondlot, 2010; Plummer et al., 2006).

A prediction of the changes expected for the Abitibi region was performed in a synthesis study of climate change for six mining regions in Quebec (Roy, 2015). This study was based on a set of climatic simulations resulting from the project CMIP5 « Coupled Models Intercomparison Phase 5 » (Taylor et al., 2012) and each simulation based on a radiative scenario called RCP «Representative Concentration Pathways» (Moss et al., 2010). These scenarios represent the possible evolutions of greenhouse gases concentration in the atmosphere according to the global socioeconomic evolution during the next decades (Taylor et al., 2012). In this study, two scenarios were considered: RCP4.5 and RCP8.5. The first one corresponds to a scenario where actions would be currently initiated to limit greenhouse effect gas emission and the second corresponds to a case where no or little changes would be achieved (Riahi et al., 2011; Thomson et al., 2011).

As for the rest of Quebec, the region of Abitibi (where the study site is located) should observe an increase of temperatures and of annual and extreme precipitation at the horizon 2080. The return periods for the extreme events would decrease from 20 years to 15-17.5 years. The snowmelt period would occur approximately one month earlier than during the historical period of 1971-2000. Also, the maximal accumulation of snow would be lower (Roy, 2015). Table 2 presents the climatic indicators related to precipitation, the predictions obtained by this study for the Abitibi region.

Tableau 4.1 : Evolution of the climatic parameters of precipitations for three temporal horizons and two RCP scenarios for the region of Abitibi compared to 1981-2000 data (Roy, 2015).

Climatic parameters	RCP	Time horizons		
		2020	2050	2080
<i>Annual precipitations (%)</i>	4.5	+4.03	+8.29	+10.70
	8.5	+4.26	+10.18	+16.13
<i>Extreme precipitations (%)</i>	4.5	+4.79	+11.49	+13.52
	8.5	+8.29	+16.13	+22.20
<i>Accumulations during extreme events (%)</i>	4.5	+7.73	+17.12	+21.48
	8.5	+9.32	+20.35	+32.37



## 4.5 Numerical modeling

Numerical modelling was performed with the software SEEP/W (Geoslope) to estimate in a preliminary manner the influence of climate change on the performance of the reclamation method. More specifically, the hydraulic behaviour of the field cells representing a case of monolayer cover made of low-sulphide tailings combined with EWT was used as a basis for calibration and long term prediction of reclamation performance. SEEP/W allows to model the flow of groundwater in porous medium and to solve analyses in transient and steady-state conditions for saturated/unsaturated materials. Numerous boundary conditions are applicable to the model, such as the atmospheric data using the land-climate interaction (LCI) boundary condition. These boundary conditions can reflect various ground surface conditions, such as bare or snow-covered ground. It is also possible to estimate directly the functions of hydraulic conductivity and water retention curve by using integrated functions into the software (Geo-Slope International Ltd., 2017). It was successfully used in other studies to describe exchanges with the atmosphere and the water flow in non-saturated tailings (Demers et al., 2009; Ethier et al., 2018; Pabst et al., 2017).

### 4.5.1 Material characterization

The tailings used for the construction of cells were sampled for physical and hydrogeological characterizations (Rey et al, 2017). The saturated hydraulic conductivity ( $k_{sat}$ ) was measured in a rigid wall permeameter (ASTM D5856-15, 2015). The WRC was measured with a pressure cell (Tempe cell - ASTM D6836-16, 2016) and described using van Genuchten (1980) model. AEV values were obtained using the two-tangent method (Fredlund and Xing, 1994). The characterization of materials during this study showed that Goldex tailings from were slightly coarser than Westwood tailings (Table 1).

Tableau 4.2 : Theoretical (Rey et al., 2017) and calibrated values of material properties

Tailings		Doyon		Goldex		Westwood
		TV	CV	TV	CV	TV
$G_s$	(-)	2.84	-	2.72	-	2.79
$D_{10}$	(mm)	$6.18 \times 10^{-3}$	-	$2.80 \times 10^{-2}$	-	$4.29 \times 10^{-3}$
$D_{60}$	(mm)	$4.96 \times 10^{-2}$	-	$2.05 \times 10^{-1}$	-	$4.36 \times 10^{-2}$
$n$	(-)	0.41	0.37	0.44	0.30	0.42
$\theta_s$	(-)	0.41	0.37	0.44	0.30	0.42
$\theta_r$	(-)	0.05	0.04	0.02	0.03	0.07
$\alpha_{vG}$	(-)	0.038	0.003	0.102	0.009	0.013
$n_{vG}$	(-)	2.097	1.777	2.237	2.577	2.844
$k_{sat}$	( $m.s^{-1}$ )	$1 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-7}$
$AEV$	(kPa)	18	10	5	50	39

$G_s$ : relative density (specific gravity) of the solid grains.

$D_{10}$ : diameter corresponding to 10% finer in the particle-size distribution.

$D_{60}$ : diameter corresponding to 60% finer in the particle-size distribution.

$n$ : porosity

$\theta_s$ : saturated volumetric water content (equal to porosity  $n$ ).

$\theta_r$ : residual volumetric water content.

$\alpha_{vG}$  and  $n_{vG}$ : van Genuchten (1980) equation parameters for the water retention curves.

$k_{sat}$ : saturated hydraulic conductivity.

## 4.5.2 Model setup and calibration

A first numerical model representing cell#1 (1 m of Goldex tailings on 1 m of Doyon tailings) was performed in 1D. A calibration simulation was initially performed by using initial parameters of materials characterization. A first stage of calibration was applied to the model and adjusted parameters obtained are presented in Table 2. AEV calibrated values are to be confirmed in the next stages of calibration. A transient-state simulation was performed to compare the results of the simulation with those of the cells monitoring (VWC, suction and flow) for the 2015-2017 period. Tighter calibration work is still to come to confirm the materials properties.

For this period, weather conditions were integrated into the model as top land-climate interaction boundary condition. Climatic data from the station of Rouyn-Noranda Airport (Environment Canada) were used; the station is located only a few kilometers from the mine and is deemed representative of field conditions. Air temperature and precipitation data correspond to the daily values. For relative humidity and wind speed, a daily average was calculated from the hourly data. In the software, the solar radiation consists of two parameters. The radiation is estimated by Seep/W according to the latitude ( $48.25^\circ$ ). A daily value of albedo was defined according to the presence or not of snow on the cell surface (0.8: fresh snow; 0.5: former snow; 0.1: bare surface).

The calculated evapotranspiration method is based on Penman Wilson equation (Geo-Slope International Ltd., 2017). Flow is left free at the bottom of the model. Initial conditions were simulated under steady-state conditions with a water level at 2 m above bottom of cell to simulate the full saturation of the cell during winter. Subsequently, under transient conditions, normal climate (January 2015 to December 2017) or simplified climate change scenario (SCCS) were applied.

### **4.5.3 Influence of climatic conditions**

Two climatic scenarios were used to assess the influence of climatic conditions on the model. The normal climate represents the climatic data of Environment Canada between 2015 and 2017 for the Rouyn-Noranda station. Secondly, a simplified climate change scenario (SCCS) was used to obtain preliminary results. As indicated previously (Table 1), the Abitibi region should see an increase of annual and extreme precipitations before 2080. Moreover, several climatic simulations suggest that drought periods could exceed two months in the future summers (Ouranos, 2015).

The simplified climate change scenario was built by applying daily precipitations superior to normal climate by 20 % and summer drought period 20 % longer i.e. 74 days instead of 62 (Ethier et al., 2018). Figure 4.2 presents an example.

No modifications were made on the other climatic parameters (temperature, wind, relative humidity) at this stage of the study.

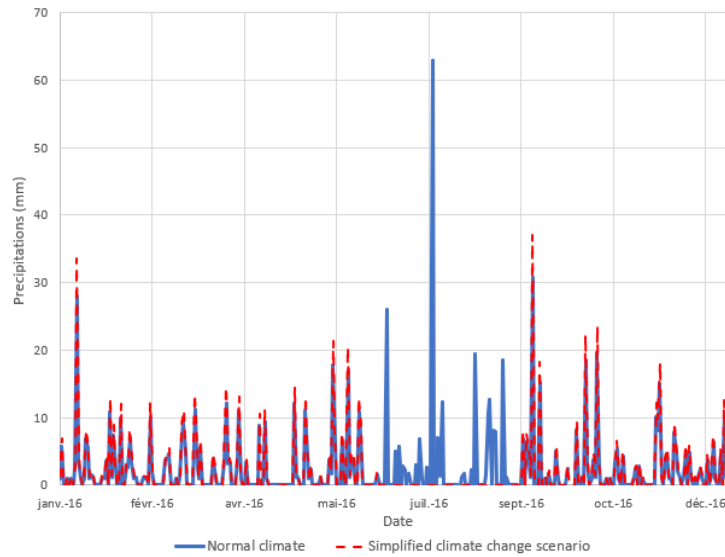


Figure 4.2 : Precipitations in mm imposed in the model for a normal climate (year 2016; blue) and for the SCCS (red)

## 4.6 Preliminary results

This paper presents preliminary results obtained for year 2016 compared to simplified climate change scenario.

The numerical model was validated by comparing field data with simulated data for VWC at 10 cm, 90 cm and 110 cm below the surface of the cell. Figure 4.3 shows the comparison between field data (obs.), simulated data with normal climate (sim.) and with SCCS.

Field data show that VWC remained more or less constant for two deepest measurement points, i.e. at 90 and 110 cm. VWC close to the surface (10 cm depth) was more affected by the phenomenon of evapotranspiration and showed more variation with time. The trends are respected for the 10 cm depth, meaning that the calibration of the model works well for this depth. At a depth of 90 cm the numerical model is more affected by climatic conditions than what field data showed. However, field data showed that the VWC was relatively constant over time, i.e. Goldex tailings remained high water content at this depth. At 110 cm deep, the correlation was good, VWC did not show important variations. Doyon tailings remained at high water content at this depth throughout the year.

For the simulation with SCCS, the 110 cm depth did not show significant change in VWC and the values stayed close to saturation for Doyon tailings. However, for both other depths, we observed a plateau during the dry summer.

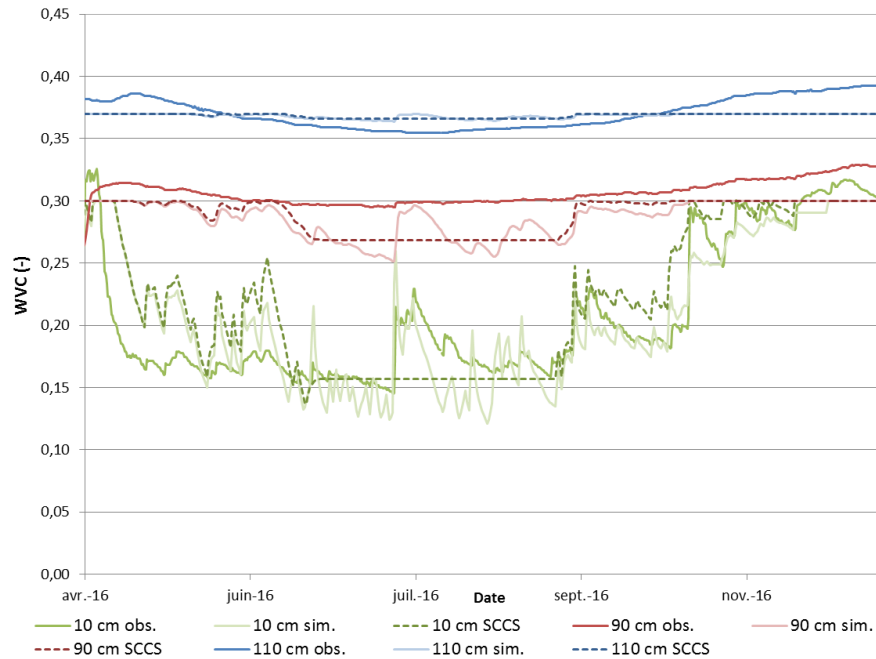


Figure 4.3 : Comparison between measured VWC (solid line), simulated with normal climate (pale line) and simulated with SCCS (dashed line).

The water level in the cell was not measured in the field in 2016, but it was simulated to observe the variations under normal climate and SCCS.

As seen on Figure 4.4, the water level remained above the value of  $\frac{1}{2}$  AEV for the Doyon tailings most of the time under normal climate conditions. During summer, at three times the water level came below the  $\frac{1}{2}$  AEV value. With SCCS, the water level stayed below the  $\frac{1}{2}$  AEV value over the summer, however, the increase in precipitation allowed to maintain the water level higher the rest of the year.

The modeled water level below  $\frac{1}{2}$  AEV of the Doyon tailings during the summer implies that tailings did not remain completely saturated and that the potential for oxidation was higher.

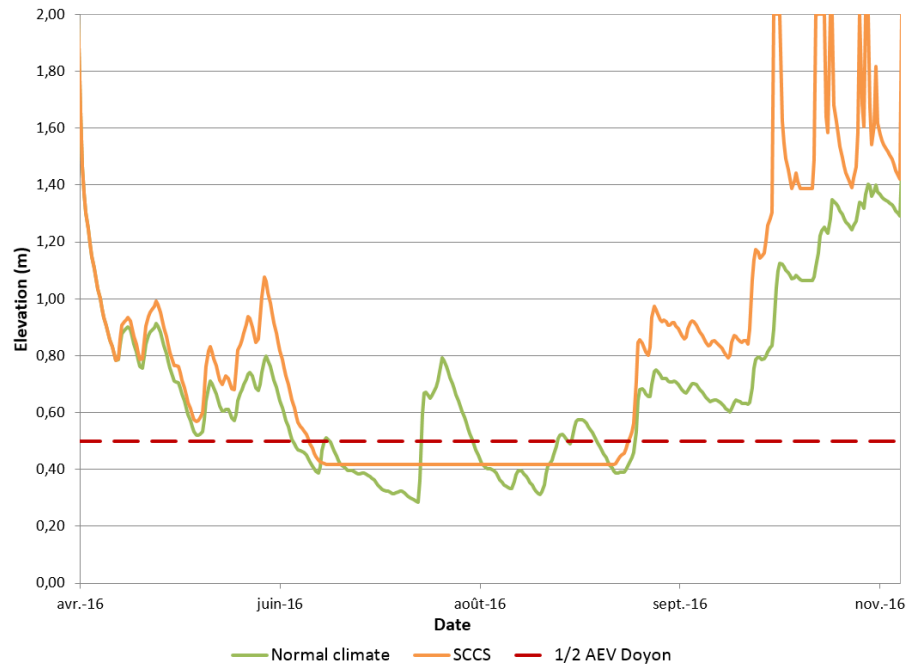


Figure 4.4 : Simulated water level elevation (m) for the normal climate (green) and for the SCCS (orange) for year 2016 (0 m = cell bottom). Red line corresponds to  $\frac{1}{2}$  AEV Doyon tailing value.

## 4.7 Discussion

Observations made on the differences between measured and simulated values at a depth of 90 cm can be explained by the heterogeneity of the Goldex tailing properties between the top and the bottom of the layer. Indeed, variations in particle size distribution can affect hydraulic properties and behaviour under normal and climate change conditions.

For observations made at 110 cm depth, modeling results do not reflect the reality. It is expected that the VWC would keep decreasing until the end of the drought, because of effect of evapotranspiration at the surface. It is therefore necessary to continue to work on the model and on the climate boundary conditions to find the parameter which will allow taking into account evapotranspiration.

As observed for the VWC, there is a plateau in the data during the dry summer simulated by SCCS. The water level should continue to decrease gradually till the end of the drought and should not remain constant. However, with SCCS, the increase in precipitation is beneficial to maintain the water level elevated during most of the year, including prior to the drought.

## **4.8 Conclusion and upcoming work**

The use of a numerical model to represent a reclamation method is an accepted process to determine the reclamation efficiency in the long term. The applicability of climatic data as boundary conditions can allow to consider the effects of climate change on the performance of the monolayer cover combined with EWT, which is strongly related to the amount of precipitation that will influence the water table level. This investigation was performed for the reclamation of the Doyon-Westwood site, where experimental field cells provide monitoring data.

The calibration of the numerical model allows reproducing the tendencies observed in the field for VWC data for year 2016. These observations will have to be confirmed with the suction data. The next stage of calibration will be made to compare all the field data i.e. from 2015 to 2017 with simulated data.

The SCCS simulation shows that the numerical model must be modified to better represent the effects of drought during a dry summer. Indeed, a drought cannot be only defined by lack of precipitation; it also involves evapotranspiration and water retention.

The next step of the project involves the use of real climate projections to refine the numerical model and boundary conditions. The climate projections will be defined using a set of climatic simulations resulting from the project CMIP5 and will be used to obtain more realistic climate conditions, adapted to the Doyon-Westwood mine site.

## **4.9 Acknowledgements**

The authors thank the RIME UQAT-Polytechnique for providing funding for this project. We also acknowledge the financial support of the FRQNT. Additional support was also provided by the employees at URSTM-IRME who assisted with the laboratory work and Iamgold Corporation partner.

## 4.10References

- Aachib, M., Mbonimpa, M., and Aubertin, M. 2004. Measurement and prediction of the oxygen diffusion coefficient in unsaturated media, with applications to soil covers. *Water, Air, and Soil Pollution* 156(1): 163-193.
- Aubertin, M., Bussière, B., and Bernier, L. 2002. *Environnement et gestion des rejets miniers*. Edited by P.I. Polytechnique.
- Aubertin, M., Bussière, B., James, M., Jaouhar, E., Martin, V., Pépin, N., Mbonimpa, M., and Chapuis, R. 2011. Vers une mise à jour des critères de stabilité géotechnique pour la conception des ouvrages de retenue de résidus miniers. In *Symposium on mines and the environment*, Rouyn-Noranda, QC. p. 38.
- Aubertin, M., Bussière, B., Pabst, T., James, M., and Mbonimpa, M. 2016. Review of the reclamation techniques for acid-generating mine wastes upon closure of disposal sites. In *Geo-Chicago 2016*. pp. 343-358.
- Aubertin, M., Dionne, J., and Marcoux, L. 1997. Design guidelines and stability criteria of engineering works for water covers. In *4th ICARD*, Vancouver, BC. pp. 1849–1866.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Demers, I., Aubertin, M., Fried, É., and Blier, A. 2008. Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada. *Minerals engineering* 21(4): 330-340.
- Blowes, D., Ptacek, C., Jambor, J., Weisener, C., Paktunc, D., Gould, W., and Johnson, D. 2014. *The geochemistry of acid mine drainage*.
- Bresson, É., Demers, I., Bussière, B., Roy, P., Pabst, T., and Chavaillaz, Y. 2018. Efficiency of reclamation methods under climate change: definition of a drought index.
- Bussière, B., Lelièvre, J., Ouellet, J., and Bois, D. 1995. Utilisation de résidus miniers désulfurés comme recouvrement pour prévenir le DMA: analyse technico-économique sur deux cas réels. In *Proceedings of Sudbury'95, Conference on Mining and the Environment*, Ed. Hynes TP & Blanchette MC, Sudbury, Ontario. pp. 59-68.



- Cosset, G. 2009. Comportement hydrogéologique d'une couverture monocouche sur des résidus miniers sulfureux: Essais en colonne et simulations numériques. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- Dagenais, A.-M. 2005. Techniques de contrôle du drainage minier acide basées sur les effets capillaires. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- Dagenais, A.-M., Aubertin, M., and Bussière, B. 2006. Parametric study on the water content profiles and oxidation rates in nearly saturated tailings above the water table. In Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD). p. 405420.
- Demers, I. 2008. Performance d'une barrière à l'oxygène constituée de résidus miniers faiblement sulfureux pour contrôler la production de drainage minier acide. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- Demers, I., Bussière, B., Benzaazoua, M., Mbonimpa, M., and Blier, A. 2007. Column test investigation on the performance of monolayer covers made of desulphurized tailings to prevent acid mine drainage. *Minerals Engineering* 21(4): 317-329.
- Demers, I., Bussière, B., Mbonimpa, M., and Benzaazoua, M. 2009. Oxygen diffusion and consumption in low-sulphide tailings covers. *Canadian Geotechnical Journal* 46(4): 454.
- Desjarlais, C., and Blondlot, A. 2010. Savoir s'adapter aux changements climatiques. Ouranos.
- Dobchuk, B., Nichol, C., Wilson, G.W., and Aubertin, M. 2013. Evaluation of a single-layer desulphurized tailings cover. *Canadian Geotechnical Journal* 50(7): 777-792.
- Ethier, M.-P., Bussière, B., Aubertin, M., Demers, I., Maqsoud, A., Dionne, J., and Roy, M. 2014. Results from a field investigation of the elevated water table technique combined with a monolayer cover on reactive tailings. In 67th Canadian Geotechnical Conference, Regina (Saskatchewan), Canada. p. 8.
- Ethier, M.-P., Bussière, B., Aubertin, M., Maqsoud, A., Demers, I., and Lacroix, R. 2013. In situ evaluation of the elevated water table technique combined with a monolayer cover on reactive tailings: monitoring strategy and preliminary results. In 66th Canadian Geotechnical Conference & 11th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, Montréal (Québec), Canada. p. 9.

- Ethier, M.-P., Bussière, B., Broda, S., and Aubertin, M. 2018. Three-dimensional hydrogeological modeling to assess the elevated-water-table technique for controlling acid generation from an abandoned tailings site in Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*: 1-19. doi: 10.1007/s10040-017-1713-y.
- Fredlund, D.G., and Xing, A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal* 31(3): 521–532. doi: 10.1016/0148-9062(95)96992-K.
- Geo-Slope International Ltd. 2017. Heat and mass transfer modeling with GeoStudio 2018.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Aachib, M., and Bussiere, B. 2003. Diffusion and consumption of oxygen in unsaturated cover materials. *Canadian Geotechnical Journal* 40(5): 916-932. doi: 10.1139/T03-040.
- MEND. 2001. Manual report 5.4.2. CANMET.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., and Kram, T. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463(7282): 747-756.
- Nicholson, R.V., Gillham, R.W., Cherry, J.A., and Reardon, E.J. 1988. Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal* 26(1): 1-8.
- Nordstrom, D.K., Blowes, D.W., and Ptacek, C.J. 2015. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update. *Applied Geochemistry* 57: 3-16.
- Ouangrawa, M. 2007. Étude expérimentale et analyse numérique des facteurs qui influencent le comportement hydro-géochimique de résidus miniers sulfureux partiellement saturés. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- Ouangrawa, M., Aubertin, M., Molson, J.W., Bussière, B., and Zagury, G.J. 2010. Preventing Acid Mine Drainage with an Elevated Water Table: Long-Term Column Experiments and Parameter Analysis. *Water, Air, & Soil Pollution* 213(1-4): 437-458. doi: 10.1007/s11270-010-0397-x.
- Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Bussière, B., and Zagury, G.J. 2009. Reactive transport modelling of mine tailings columns with capillarity-induced high water saturation for

- preventing sulfide oxidation. *Applied Geochemistry* 24(7): 1312-1323. doi: 10.1016/j.apgeochem.2009.04.005.
- Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Zagury, G., and Bussière, B. 2006. The effect of water table elevation on acid mine drainage from reactive tailings: a laboratory and numerical modeling study. In *Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, St. Louis, Mo. pp. 26-30.
- Ouranos. 2015. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec: partie 1, évolution climatique au Québec. Ouranos.
- Pabst, T., Aubertin, M., Bussière, B., and Molson, J. 2014. Column tests to characterise the hydrogeochemical response of pre-oxidised acid-generating tailings with a monolayer cover. *Water, Air, & Soil Pollution* 225(2): 1841.
- Pabst, T., Molson, J., Aubertin, M., and Bussière, B. 2017. Reactive transport modelling of the hydro-geochemical behaviour of partially oxidized acid-generating mine tailings with a monolayer cover. *Applied Geochemistry* 78: 219-233. doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.01.003.
- Plummer, D., Caya, D., Frigon, A., and Côté, H. 2006. Climate and Climate Change over North America as Simulated by the Canadian RCM. *Journal of Climate* 19(13): 3112-3132.
- Rey, N.J., Demers, I., Bussière, B., Mbonimpa, M., and Lortie, S. 2016. Field experiments to test the elevated water table concept combined with a desulfurized tailings cover layer. In *Geo-Chicago 2016*, Chicago, USA. pp. 289-298.
- Rey, N.J., Demers, I., Bussière, B., Mbonimpa, M., and Lortie, S. 2017. Laboratory and field study of oxygen flux and hydrogeological behaviour of monolayer covers made of low-sulfide tailings combined with an elevated water table placed over acid-generating mine tailings. In *Geo-Ottawa 2017*, Ottawa (Ontario), Canada.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., and Rafaj, P. 2011. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 109(1-2): 33.

- Romano, C.G., Ulrich Mayer, K., Jones, D.R., Ellerbroek, D.A., and Blowes, D.W. 2003. Effectiveness of various cover scenarios on the rate of sulfide oxidation of mine tailings. *Journal of Hydrology* 271(1-4): 171-187. doi: 10.1016/s0022-1694(02)00348-7.
- Roy, P. 2015. Synthèse des changements climatiques pour le secteur minier. Ouranos.
- Senes. 1996. Review of use of an elevated water table as a method to control and reduce acidic drainage from tailings. MEND. MEND Report 2.17.1.
- Sjöberg, B., Wilson, G., and Aubertin, M. 2001. Field and laboratory characterization of a desulphurized tailings cover system. In *Proc. Fifty-fourth Canadian Geotechnical Conference*.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., and Meehl, G.A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(4): 485-498.
- Thomson, A.M., Calvin, K.V., Smith, S.J., Kyle, G.P., Volke, A., Patel, P., Delgado-Arias, S., Bond-Lamberty, B., Wise, M.A., and Clarke, L.E. 2011. RCP4. 5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic change* 109(1-2): 77.

## **CHAPITRE 5     ARTICLE 2: EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON THE HYROGEOLOGIC BEHAVIOUR OF A MONOLAYER COVER COMBINED WITH AN ELEVATED WATER TABLE**

Ce chapitre présente les principaux résultats obtenus à la suite des modélisations numériques pour évaluer l'influence des changements climatiques sur la performance de la technique de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche dans le cas du site Doyon-Westwood, cette fois-ci en intégrant les projections climatiques jusqu'en 2100. Ces résultats sont présentés dans l'article suivant qui a été soumis pour publication le 5 juillet 2019, au *Canadian Geotechnical Journal*. Les co-auteurs de cet article sont Isabelle Demers, Thomas Pabst, Émilie Bresson de l'IRME et Mario Gagnon de Iamgold.

### **5.1 Abstract**

Several approaches exist to limit the chemical reactions responsible for the generation of acid mine drainage (AMD). A monolayer cover combined with an elevated water table (EWT) can efficiently contribute to limit the flow of oxygen that can reach reactive tailings. The effectiveness of this method is mainly dependent on the level of the water table and the degree of saturation of the tailings above the water table. Precipitation and evaporation influence directly the position of the water table level. In the context of climate change, the evolution of the future climate must be considered to ensure the efficiency of reclamation over the long term. For the Abitibi region (Quebec, Canada), climatic models predict an increase in the precipitation regime and extreme events (precipitations and drought). A numerical study was carried out using experimental field data from the Doyon-Westwood mine site and future weather conditions predicted using climate scenarios up to year 2100. Results showed that no significant influence of climate scenario was observed on the field cell hydrogeological behaviour. The critical parameter was the water table level, at  $\frac{1}{2}$  AEV the cover-tailings interface remained close to saturation over the entire period 2020-2100 while at 1 AEV the interface did not remain saturated more than 90% of the time during the same period. A 1D numerical model of the tailings pond was then used to simulate the effect of climate change on the performance of this type of cover. A 1 m cover was not sufficient to provide a constant degree of saturation above 85%. A cover thickness of 2.1 m was able to meet the 85%  $S_r$  criterion over the entire time period with the least favorable climate scenario for the

modeling conditions. Results also showed that materials properties and water table level are the two parameters that have the most influence on the hydrogeological behaviour of the reclamation method. Evaluation of climate change effects in modeling cover hydrogeological behaviour can be used to adapt cover design for projected climate conditions.

## **5.2 Introduction**

Acid mining drainage (AMD) is one of the main environmental challenges on a mine site. AMD is characterized by low pH and high concentrations of dissolved metals and sulphates (Blowes et al., 2014; Nordstrom et al., 2015) and can be very damaging to the environment. Tailings produced by mining operations are usually stored in tailings storage facilities on the surface. Tailings often contain significant concentration of sulfide minerals which can react with oxygen and water and generate AMD.

To control AMD generation, tailings ponds need to be reclaimed. Reclamation methods can act as a barrier limiting the access of oxygen or water to the tailings and therefore limiting oxidation reactions. In temperate climates where the water balance is positive (i.e. precipitations are more important than evaporation), oxygen barriers are often considered the most efficient reclamation approach (Aubertin et al., 2016; SRK, 1989). Water cover is one example of oxygen barrier (MEND, 2001). Water makes an efficient barrier to limit oxygen migration towards the reactive tailings, because the oxygen diffusion coefficient ( $D_e$ ) in water is 10000 times lower than in air (Aachib et al., 2004). Despite its efficiency, this type of reclamation method can present geotechnical risks associated to the containment infrastructures (Aubertin et al., 2011; Aubertin et al., 2016; Aubertin et al., 1997).

### **5.2.1 Elevated water table combined with a monolayer cover**

An alternative method to the water cover is the concept of the monolayer cover combined with an elevated water table (EWT). The EWT technique consists of maintaining the water table level at an optimal position within the tailings ponds by the control of the water budget (Cosset et al., 2010; Dagenais et al., 2006; Demers et al., 2008; Ethier et al., 2018a; Ouangrawa et al., 2006; Pabst et al., 2014; Senes, 1996). Because of the capillary rise, if the water table is maintained at an optimal depth, all tailings situated above the water table will remain close to saturation (Cosset, 2009). When a material is close to full water saturation the oxygen flow, which is proportional to  $D_e$  and

varies according the degree of saturation ( $S_r$ ), has a similar behaviour as in a water cover (Dagenais et al., 2006). In laboratory, the air entry value (AEV), related to the height of the capillary rise above the phreatic surface, can be estimated from the water retention curve (WRC - Aubertin et al., 2002; Aubertin et al., 1995).

The objective of the monolayer cover is to control the water budget and facilitate the rise of the water table in the tailings (Cosset et al., 2010; Nicholson et al., 1989; Pabst et al., 2017b; Sjoberg et al., 2001). When coarse-grained material is used, the main objective is to reduce evaporation from the tailings and to favor infiltration (Dagenais et al., 2006; Ouangrawa et al., 2010; Ouangrawa et al., 2009). If the cover material is as fine or finer than the tailings, the objective of the cover is to be an oxygen barrier (Ethier et al., 2014; Ethier et al., 2013; Ethier et al., 2018b; Nicholson et al., 1989). The establishment of this cover requires a large amount of materials and an alternative aimed by the « integrated tailings management » approach (Benzaazoua et al., 2008; Benzaazoua et al., 2000; Bussière et al., 1995) proposes the use of non-reactive or desulfurized tailings (i.e. non-acid generating) as cover material. Additional advantage of this alternative allows oxygen consumption by oxidation within the cover and decreases the oxygen flux which could migrate towards the tailings (Demers et al., 2008; Demers et al., 2009; Dobchuk et al., 2013; Mbonimpa et al., 2003; Romano et al., 2003; Sjoberg et al., 2001).

Climate factors influence directly the water budget. While the increase in precipitation would have a positive impact on the reclamation method, it is the drought events that would be an issue. In this context, it is important to integrate the evolution of the future precipitation regime in the design of this reclamation method to ensure the efficiency to limit AMD over the long term. The objective of this work was to evaluate the hydrogeological behaviour of a monolayer cover system using climate change projections, and to determine the most significant parameters that affect the hydrogeological response.

## **5.2.2 Climate change projection concepts and apprehended changes for the studied region**

A climate model is a numerical representation of the entire globe or part of it, defined by geophysical and meteorological parameters. Numerical resolution of a climate model achieves a climate simulation for a past and/or a future period. The term « climate projection » is used for

future periods (Charron, 2016; Edwards, 2011; Flato, 2011; Moss et al., 2010). Climate modeling groups from around the world joined to create a set of coordinated climate model experiments, to obtain the most representative climate projection results possible. It is the case of the project CMIP5 (Coupled Models Intercomparison Phase 5) which brought together 20 climate centres, representing more than 50 numerical climate models (Taylor et al., 2012). These different climate simulations make it possible to take into account different scenarios of socio-economic evolution, the natural variability of the climate as well as the structure of the models in terms of solving the equations and spatial resolution (Charron, 2016; Taylor et al., 2012).

Climate simulations are obtained according to different greenhouse gas emissions scenario called « Representative Concentration Pathways » (RCP -Moss et al., 2010). These RCP scenarios represent the different possible evolutions of the concentration of greenhouse gases in the atmosphere according to the socioeconomic evolution on a planetary scale during the next decades (Taylor et al., 2012). RCP scenarios are named according to the value of the total radiative forcing that they should reach in 2100 (Charron, 2016; Roy, 2015). The total radiative forcing is defined in climatology by the difference between the radiative energy received and the radiative energy emitted by a system. In the case of the study of climate change, total radiative forcing measures the ability of a factor, such as a greenhouse gas, to disrupt the energy balance of the system, for example by causing warming of the atmosphere. There are several RCP scenarios used such as RCP4.5 and RCP8.5. RCP4.5 corresponds to a scenario where actions would be undertaken to limit the emission of greenhouse gases. The radiative forcing reaches a maximum of  $4.5 \text{ W/m}^2$  by 2100 and remains constant after 2100. RCP8.5 is the most pessimistic scenario where few or no changes in greenhouse gas emissions would be made. In this case, radiative forcing reaches a maximum of  $8.5 \text{ W/m}^2$  by 2100 (Riahi et al., 2011; Thomson et al., 2011). Once climate projections are post-treated, they are called climate scenarios (Charron, 2016).

A post-treatment technique must be applied to the simulation data to be used, such as quantile mapping, delta change correction or linear scaling (Piani et al., 2010; Teutschbein et al., 2012). These bias correction methods compare data produced by the climate model with real observations and permit to adjust model results. These methods are based on the stationarity hypothesis, that the biases between observations and model data are considered to be constant, and therefore independent of the control period. According to this hypothesis, it is possible to apply the same correction algorithm to current and future climate conditions (Teutschbein et al., 2012).



As many other regions in the world, Quebec will be affected by climatic changes. Variations of temperature and annual average precipitation are expected within the next century. Also, this region should expect an increase in the frequency and intensity of extreme events (Desjarlais et al., 2010; Plummer et al., 2006). The increase in temperature should be greater in winter than in summer. By 2050, average winter temperatures will increase by 2.5 to 3.8°C in southern Quebec and 4.5 to 6.5°C in the north. In summer, average temperature increases will be between 1.9 and 3.0°C in the south and 1.6 to 2.8°C in the north (Desjarlais et al., 2010; Plummer et al., 2006). The increase in average and extreme precipitation will be higher in winter north of the 50th parallel (17 to 30%) than in the south (9 to 18%), while in summer, the increase will be from 3 to 12% in the north, with little change in the south (Desjarlais et al., 2010; Monette, 2012).

Studies on climate change estimates usually involve regional or global scales, but some studies focus on more specific areas usually related to a specific issue. This is the case of a report prepared by Ouranos consortium (Roy, 2015), as part of climate change risk and vulnerability analysis for Quebec's mining sector (URSTM, 2017). In this report, a prediction of the changes expected for six mining regions in Quebec including the Abitibi region, is presented. Ouranos study used a set of climate simulations resulting from the CMIP5 project and considered RCP4.5 and RCP8.5.

Abitibi region should observe at the horizon 2080, an increase in temperature and in annual and extreme precipitation. The return periods for the extreme events would decrease from 20 years to 15-17.5 years. The snowmelt period would occur approximately one month earlier than during the historical period of 1971-2000. Also, the maximal accumulation of snow would be lower (Roy, 2015). Table 1 presents the climate indicators related to temperature and precipitation, key parameters for the estimation of the performance of the reclamation method, obtained by this study for the Abitibi region.

Tableau 5.1 : Evolution of the climate indicators for three temporal horizons and for two RCP scenarios for the region of Abitibi compared to historical period 1981-2000 (adapted from Roy, 2015).

Climate indicators	RCP	Time horizons		
		2020	2050	2080
<i>Average temperature during summer (°C)</i>	4.5	1.3	2.5	3.2
	8.5	1.5	3.4	5.9
<i>Average temperature during winter (°C)</i>	4.5	1.6	3.1	4.0
	8.5	1.7	4.3	7.3
<i>Annual precipitations (%)</i>	4.5	4.0	8.3	10.7
	8.5	4.3	10.2	16.1
<i>Extreme precipitations (%)</i>	4.5	4.8	11.5	13.5
	8.5	8.3	16.1	22.2
<i>Accumulations during extreme events (%)</i>	4.5	7.7	17.1	21.5
	8.5	9.3	20.4	32.4

## 5.3 Site description

Numerical simulations based on field conditions were performed to evaluate the influence of climate change on the reclamation performance. Results of experimental cells installed on the Doyon-Westwood site were used to calibrate the numerical model. Climate data estimated for the Val-d'Or region up to year 2100 were integrated into the model to assess the efficiency of the reclamation method in the long-term.

### 5.3.1 Location and reclamation plan

The Doyon-Westwood gold mine, property of Iamgold Corp., is located approximately forty kilometers east of Rouyn-Noranda (Abitibi region, Quebec). Doyon deposit has been mined (open-pit and underground) between 1978 and 2010 and the tailings generated by this operation were stored in three tailings ponds. Doyon tailings are acid-generating, and contain 2 to 4% of sulphides, mainly pyrite, and have a low neutralization potential (-87 kg CaCO<sub>3</sub>/t). The dykes of the tailings ponds are relatively impermeable (Demers, 2008; Demers et al., 2008). The reclamation plan is to use desulfurized tailings as cover material (Benzazoua et al., 2008) combined with an EWT.

The reclamation method was first tested in laboratory with experimental columns. The influence of various parameters on the performance of the method was observed such as water level, residual sulphide content of tailings used as cover and cover thickness (Demers et al., 2008). This

investigation allowed demonstrating the efficiency of the method with the Doyon material. The subsequent 1D numerical modeling allowed determining the configuration of the cover as being one meter thick, containing 0.8% of sulphide and with a water table level located at the interface between Doyon tailings and the cover for modeled conditions (Demers et al., 2008).

The exploitation of Doyon mine stopped in 2010, but Westwood mine, located to two kilometers east of the Doyon mine, began in 2014. Westwood desulfurized tailings are planned to be used for the reclamation of ponds #2 and #3 (Blier et al., 2012). Laboratory columns and field cells allowed testing cover thickness, grain size distribution, and water table level and confirmed the efficiency of the method for a different monolayer cover material (Rey et al., 2017).

### 5.3.2 Experimental field cells

Experimental cells with different configurations of cover thickness and water level were installed on the Doyon-Westwood site in 2015 to assess the reclamation method in the field (Rey et al., 2016). The cells were shaped as truncated inverted pyramids. Cells were filled at the base with one meter of sulfidic Doyon tailings. The monolayer cover was composed of one meter of desulfurized tailings from the Goldex mine (Val-d'Or, Agnico Eagle Mines Ltd). The base of the cells was equipped with drains to set the water table level. The drain outlets were located 1 meter below the cover-tailings interface for cell #1 and two meters for cell #2 corresponding to  $\frac{1}{2}$  AEV and 1 AEV of the Doyon tailings respectively. Hydrogeological parameters were measured over several years (2015-2018) to monitor the performance of the reclamation method. The volumetric water content (VWC) was measured with Decagon 5TM sensors and suction with Watermark sensors. Probes were installed 10 cm below the surface of the desulfurized tailings, 10 cm above the cover-tailings interface and 10 cm below this interface (Figure 5.1; Rey et al., 2016).

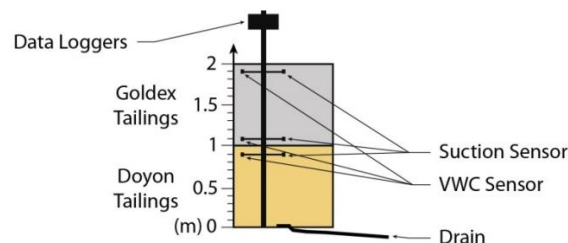


Figure 5.1 : Configuration and instrumentation of field cell (adapted from Rey et al., 2017)

## 5.4 Methodological approach

### 5.4.1 Material characterization

Doyon, Goldex and Westwood tailings were sampled for physical and hydrogeological characterization in the laboratory. The particle size distribution was obtained by laser diffraction analysis (Malvern Mastersizer) and relative density of the grains (Gs) was obtained using a helium pycnometer (Micrometric - ASTM D5550-14). The particle size distributions were similar to other tailings in Quebec (Aubertin et al., 2002; Bussière et al., 2007), with Goldex tailings slightly coarser than Westwood tailings (Figure 5.2; Rey et al., 2016, 2017).

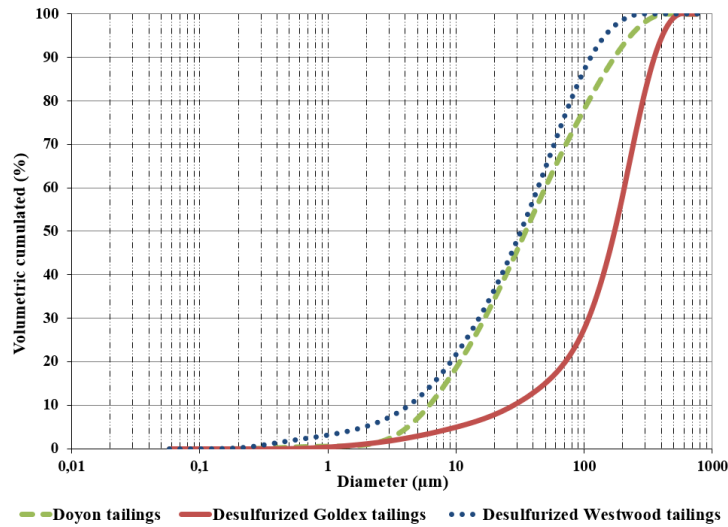


Figure 5.2 : Cumulative volumetric grain size curve of tested materials

The saturated hydraulic conductivity ( $k_{sat}$ ) was measured using rigid wall permeameters (ASTM D5856-15, 2015). Experimental results were compared to predicted values using the modified Kozeny-Carman model (KCM; Mbonimpa et al., 2002). A Tempe cell was used to measure the water retention curve (ASTM D6836-16, 2016) and fitted using van Genuchten (1980) model. AEV values were obtained using the two-tangent method (Fredlund et al., 1994).

Measured AEV values were 1.6 m for Doyon tailings, 0.6 for Goldex tailings, and 2.8 m for Westwood tailings (Figure 5.3a). Measured saturated hydraulic conductivities were  $4 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$  for Doyon tailings,  $5 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$  for Goldex tailings, and  $3 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$  for Westwood tailings. Permeability functions were calculated with Mualem model for each material (Figure 5.3b).

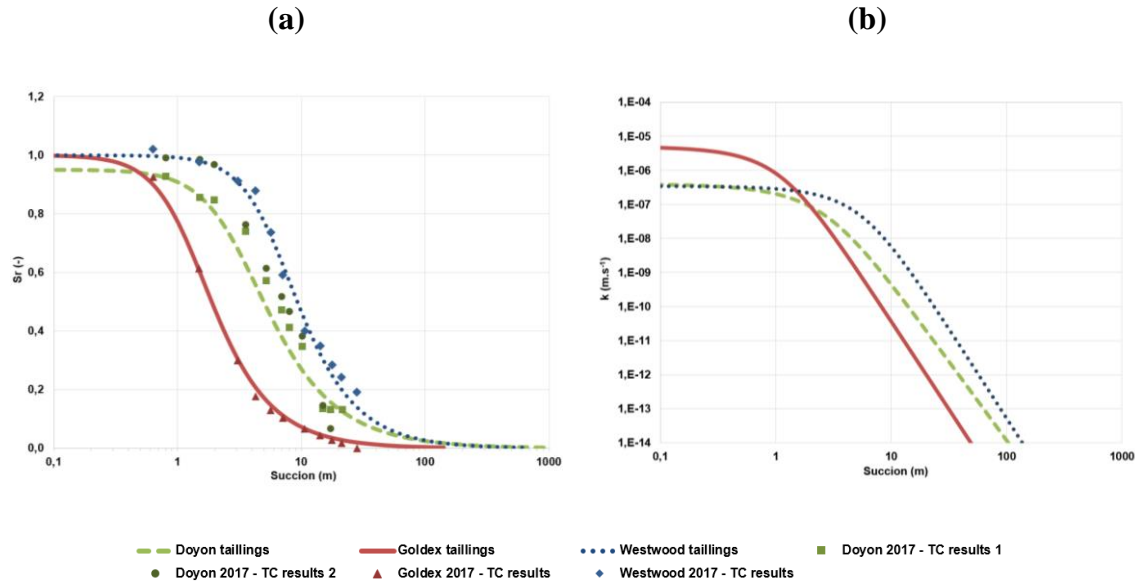


Figure 5.3 : Tempe cell results, WRC van Genuchten model (a) and permeability functions (b) for Doyon, Goldex and Westwood tailings

#### 5.4.2 Model setup and calibration

Numerical modelling was performed with SEEP/W (GeoSlope Inc., version). The hydrogeological behaviour of the field cells was used for calibration and long-term prediction of reclamation performance under a specific set of conditions. SEEP/W was used in other studies to describe exchanges with the atmosphere and water flow in non-saturated tailings with monolayer cover and EWT (Demers et al., 2009; Ethier et al., 2018b; Pabst et al., 2017b).

SEEP/W allows to model the flow of groundwater, heat and gases (especially oxygen), in porous media and to solve analyses in transient and steady-state conditions for saturated/unsaturated materials (Geo-Slope International Ltd., 2017). Evapotranspiration can be calculated by the software using Penman Wilson or Penman Monteith equations (Geo-Slope International Ltd., 2017).

A numerical model representing each field cells was established in 1D. Mesh size was 0.1 m. Convergence parameters were defined in SEEP/W (Maximum number of iterations = 500 and maximum pressure head difference = 0.005 m). A convergence graph validated that there were no converging pressure head nodes.

Weather conditions were integrated into the model as top LCI boundary condition. Daily climate data from the station of Rouyn-Noranda Airport (Environment and Climate Change Canada - ECCC) from July 24 2015 to October 19 2018 were used; the station is located about 20 kilometers west of the mine and was deemed representative of field conditions. The radiation was estimated by SEEP/W according to the mine site latitude ( $48.25^\circ$ ). A daily value of albedo was defined according to the presence or not of snow on the cell surface: fresh snow = 0.8; former snow = 0.5; bare surface = 0.1 (Villeneuve et al., 2007). The amount of ground snow can be calculated by SEEP/W based on several factors: snow density ( $100 \text{ kg/m}^3$ ), snow removal (0.55), daily snowmelt thickness (0.03 m) and initial snow thickness (0 m).

The initial conditions in the model were determined by carrying out a steady-state analysis using characteristics of both materials obtained in laboratory and initial water level. Transient-state simulations were performed afterwards to calibrate the model by adjusting  $k_{sat}$  and WRC, in order to represent the VWC and suction values obtained on the field. Adjusted parameters obtained after calibration are presented in Table 2. The mean in situ porosity ( $n$ ) measured during the construction of the cells was 0.36 in cell#1 and 0.29 in cell#2 for the Doyon tailings, for the Goldex tailings a value of 0.31 was obtained for both cells. The calibrated values used for porosity were close to in situ porosity values, except for the Doyon material on cell #2.

Tableau 5.2 : Calibrated values of Doyon and Goldex properties obtain by calibration of the numerical model

Tailings		Doyon	Goldex	
		Cell #1 & 2	Cell #1	Cell #2
$n \ \& \ \theta_s$	(-)	0.36	0.32	0.31
$\theta_r$	(-)	0.04	0.03	0.03
$\alpha_{vG}$	( $\text{m}^{-1}$ )	0.31	0.94	0.88
$n_{vG}$	( $\text{m}^{-1}$ )	1.72	2.73	3.11
$k_{sat}$	( $\text{m.s}^{-1}$ )	$2.6 \times 10^{-7}$	$2.3 \times 10^{-6}$	$1.9 \times 10^{-6}$
$AEV$	(m)	1.8	0.6	0.7

The second step of the calibration was to adjust the water table level. Initial data used was a water level equivalent at  $\frac{1}{2}$  AEV (cell #1) and 1 AEV (cell #2) for Doyon tailings i.e. 0.9 m and 1.8 m. The calibration of the model allowed showing that the water level average was approximately 0.4m for cell #1 and 0.6m for cell #2 (below the interface). Fields observations confirmed also these values. A schematic representation (1D) of numerical models of field cells is presented in Figure 5.4.

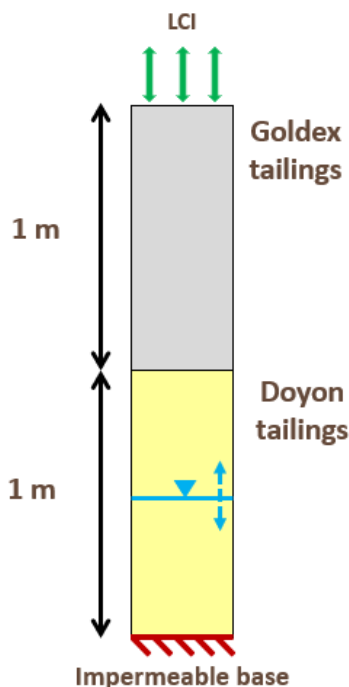


Figure 5.4 : Schematic representation of numerical model of field cells

The calibration of the model was validated by comparing VWC results of the simulation with those of the cells monitoring for the 2015-2018 period at 110 cm (green), 90 cm (blue) and 10 cm (red) below the cell surface (Figures 5.5 et 5.6). Values were calibrated for the 2016 period and validated with the other years. Only results from spring to fall are shown because monitoring probes did not record data during winter.

VWC values changed with precipitation events; the heavier the precipitation, the more quickly these values increased. During periods of low or no precipitation, VWC values decreased more or less quickly according to the duration of these periods. VWC values measured at 10 cm below the surface showed the most variations because the impact of precipitation and evaporation is more pronounced at shallow depth. VWC values measured at 110 cm showed little variations. As a general rule, after the winter VWC values increase during spring due to the snowmelt period. During the summer, VWC values decreased gradually but were punctuated by increases due to precipitation episodes. Finally, during autumn, which is usually rainier, VWC values gradually increased again.

VWC field data showed less variations when compared to simulated results; the numerical model was more sensitive to precipitation patterns than those measured by field sensors. For the three

depths observed, simulated volumetric water contents were usually within the sensors error ( $\pm 0.03$ ; Decagon Devices Inc., 2017) and trends were similar between field and simulated data, with some exceptions. In July 2018, field VWC at 90 cm decreased more than simulated data during a period with low precipitations, for both cells. At 10 cm, in 2015 for cell #1 and in 2016 for cell #2, simulated data were slightly above and below the sensor limit.

The calibration of numerical models carried out with SEEP/W, by adjusting of the hydrogeological properties, was able to reproduce the field data obtain for cell#1 and cell #2 for the 2015-2018 period. The next steps were first the application of projected climate scenarios to the cells model. Subsequently, a 1D numerical model representing a column of tailings in the Doyon-Westwood tailings ponds was conducted to test projected climate scenarios in an applied case.



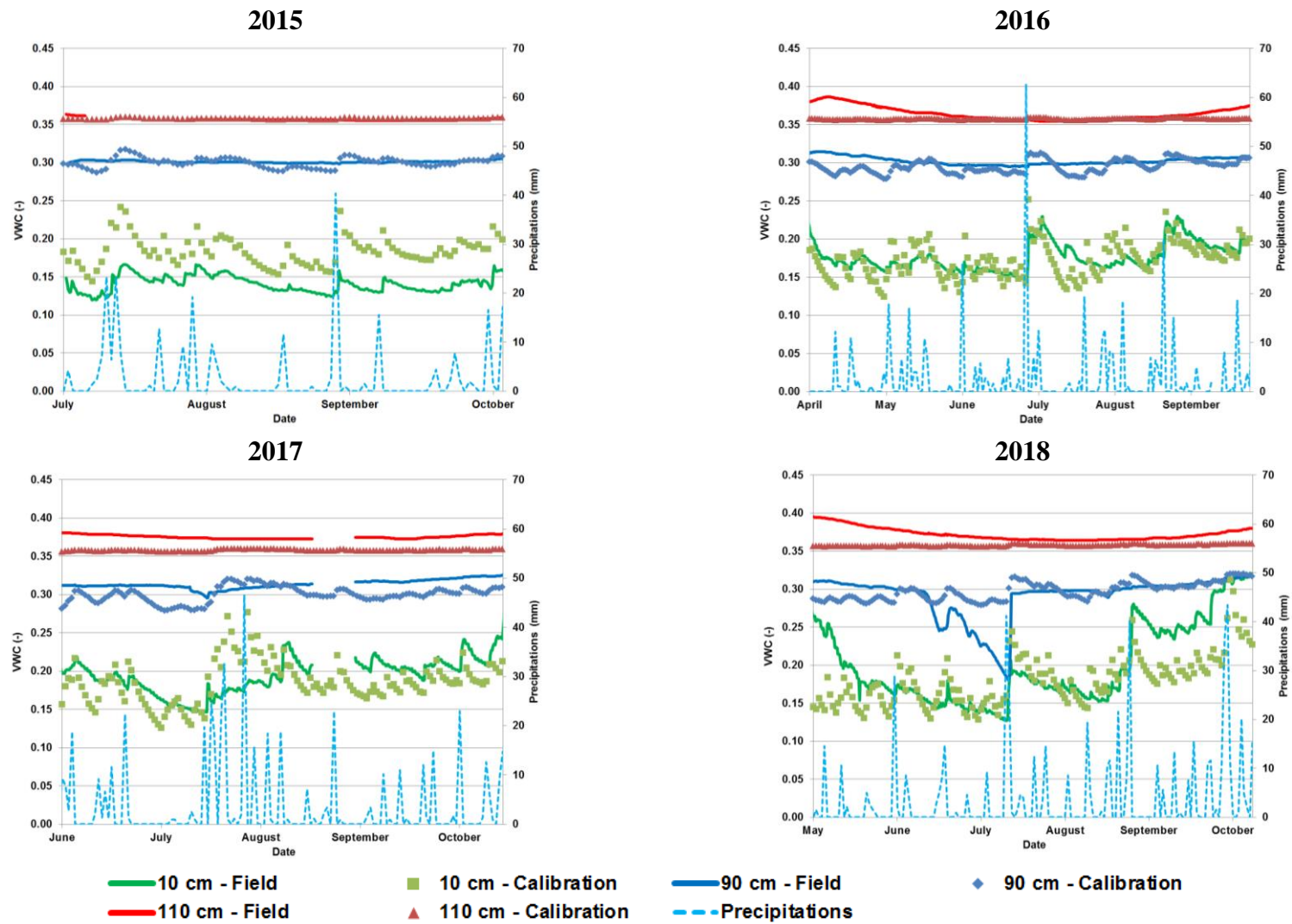


Figure 5.5 : Comparison between field VWC measurements and simulated calibration for 2015-2018 period for Cell #1

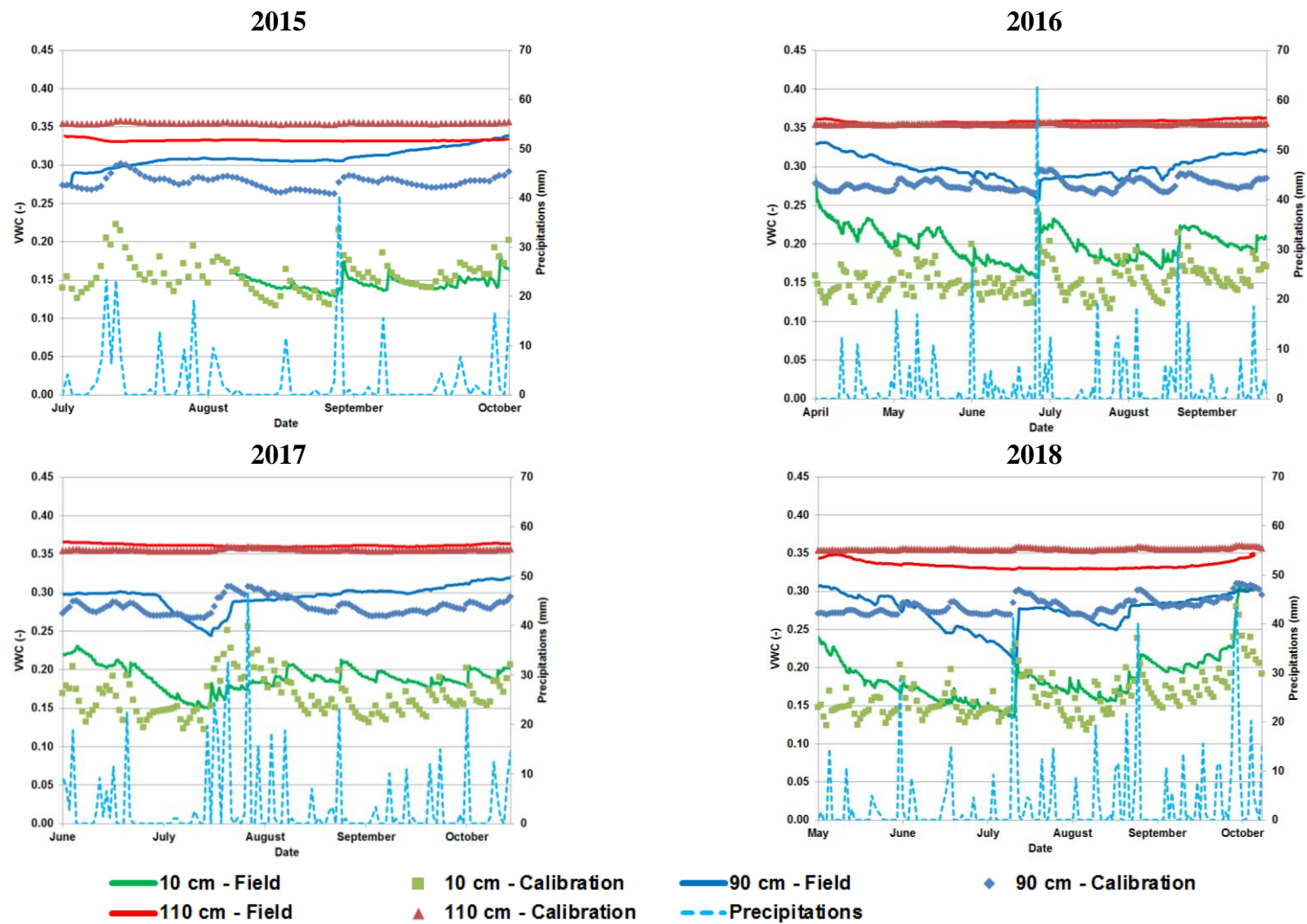


Figure 5.6 : Comparison between field VWC measurements and simulated calibration for 2015-2018 period for Cell #2

### 5.4.3 Projection of future climate conditions

Weather data obtained by climate projection were integrated in the numerical model. In order to perform projections in a given region, ECCC surface observation station was selected according to the following criteria: continuous recording over a long period of time (more than 20 years) and availability of all meteorological data (air temperature, precipitation, relative humidity, and wind speed). The Val-d'Or airport station, situated 60 km east of the Doyon-Westwood site, was used because the Rouyn-Noranda station did not meet the criteria. A total of nine climate models from CMIP5 and CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment; Giorgi et al., 2009) climate research projects were used to conduct the climate simulations. Two radiative scenarios, RCP4.5 and RCP8.5 were used. A post-treatment technique, quantile mapping method, was applied on the 18 different climate projections.

Temperature and precipitation variations are key parameters in the case of this study that were obtained from climate projections. Several scenarios, including a worst-case scenario, must be selected to test the efficiency of the reclamation method. From 18 climate projections over the period 2020-2100, three were used to be integrated to the numerical model (Table 3). Temperature and precipitation variations shown in Table 3 represent expected changes for 2100. The worst-case scenario in the case of this study combined a low precipitation variation with a high temperature variation (IPSL-CM5A-MR). The second climate scenario used presents a significant increase in precipitation (GFDL-ESM2G). The third climate scenario used shows precipitations and temperatures variations in between the values of the two other scenarios (CanESM2). Evolution of temperatures and precipitations for the three selected climate scenarios from 2020 to 2100 are shown in Figure 5.7. From these three scenarios, daily climate data were generated from 1950 to 2100. From these results, data from 2020 to 2100 were selected and integrated to the numerical models of field cells and Westwood-Doyon tailings ponds #2 (temperature, precipitation, relative humidity and wind speed).

Tableau 5.3 : Temperature and precipitation variations of the selected climate scenarios used for the numerical model with SEEP/W

Selected climate scenarios	Climatic model	RCP	$\Delta T$ (°C)	$\Delta Pr$ (%)
1	IPSL-CM5A-MR	8.5	6.1	3.5
2	GFDL-ESM2G	8.5	4.8	21.8
3	CanESM2	4.5	4.4	11.9

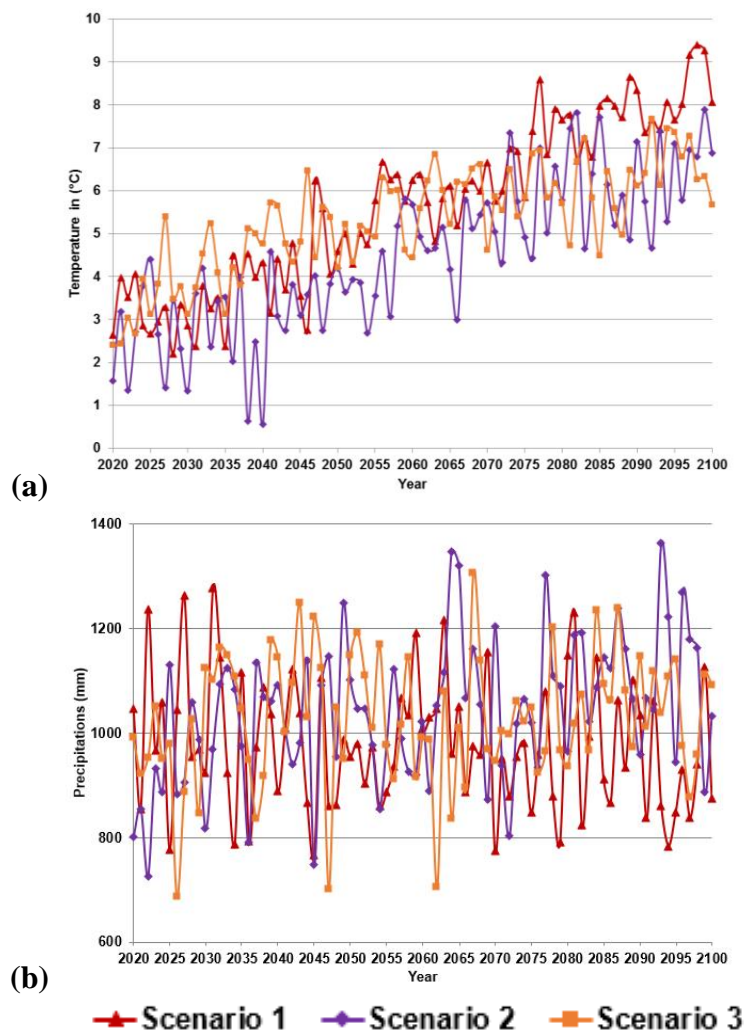


Figure 5.7 : Evolution from 2020 to 2100 of mean annual temperature (a) and mean annual precipitation (b), for the three selected climatic scenarios at the Val-d'Or station.

## 5.5 Results

### 5.5.1 Effect of future climate conditions on the performance of the field cells

The three selected climatic scenarios were applied on the model of cell #1 and #2. The initial water table level was defined at  $\frac{1}{2}$  AEV (cell #1) and 1 AEV (cell #2) for Doyon tailings i.e. 0.9 m and 1.8 m below the interface to observe the influence of this parameter on the evolution of the VWC. The least rainy and wettest summer years (June to September) were defined for each climate scenario. The evolution of VWC was assessed at critical points of the model, i.e. near the interface at 110, 100 and 90 cm (Figures 5.8 and 5.9).

In both cases, the general trend of VWC evolved with the precipitation patterns. VWC measurements in Goldex tailings (in red) were more affected by the effect of weather conditions than measurement in Doyon tailings (in green).

In the case of cell #1, for the three climatic scenarios VWC at 110 cm remained above 85%  $S_r$  for the Doyon tailings during the entire period 2020-2100, whatever the precipitations pattern during summer. The same observations can be made at the interface (100 cm), where VWC remained also above the 85%  $S_r$  for the Goldex tailings during the entire period 2020-2100. Therefore, the entire thickness of the Doyon tailings remained completely saturated all the time. This cell configuration with water table level defined at  $\frac{1}{2}$  AEV was effective to limit the migration of the oxygen in the reactive tailings and consequently the AMD generation independently of the selected climate scenario and even in the case of a summer with minimal precipitation.

In the case of cell #2, for the three climate scenarios VWC at 110 cm remained above the 85%  $S_r$  for the Doyon tailings during the entire period 2020-2100, whatever the precipitations pattern during summer. It is noted that at this depth, VWC is more affected by the effect of weather conditions than in the case of cell #1 because of the greater distance to the water table level. However, at the interface (100 cm) VWC remained below the 85%  $S_r$  for the Goldex tailings for the three climate scenarios for years with the least summer precipitation. In the case of years with rainiest summer, VWC at 100 cm was superior at the 85%  $S_r$  during punctual significant rainy events, but came down subsequently.

These observations showed that the material at the interface between Doyon and Goldex tailings did not remain completely saturated all the time whatever the selected climate scenario. With water

table level defined at 1 AEV, oxygen migration may not be sufficiently limited by the Goldex cover layer. This system could be at risk of AMD generation if Doyon tailings also desaturate near the interface. These results show that the efficiency of the reclamation method is mainly related to the position of the water table level. A positive precipitation pattern will have a helpful impact on the performance of the reclamation method but cannot compensate in the long term for a too low position of the water table level. For both modeled cells, the selected climate scenario had no significant influence on the overall behaviour of the reclamation method for the modeling conditions.



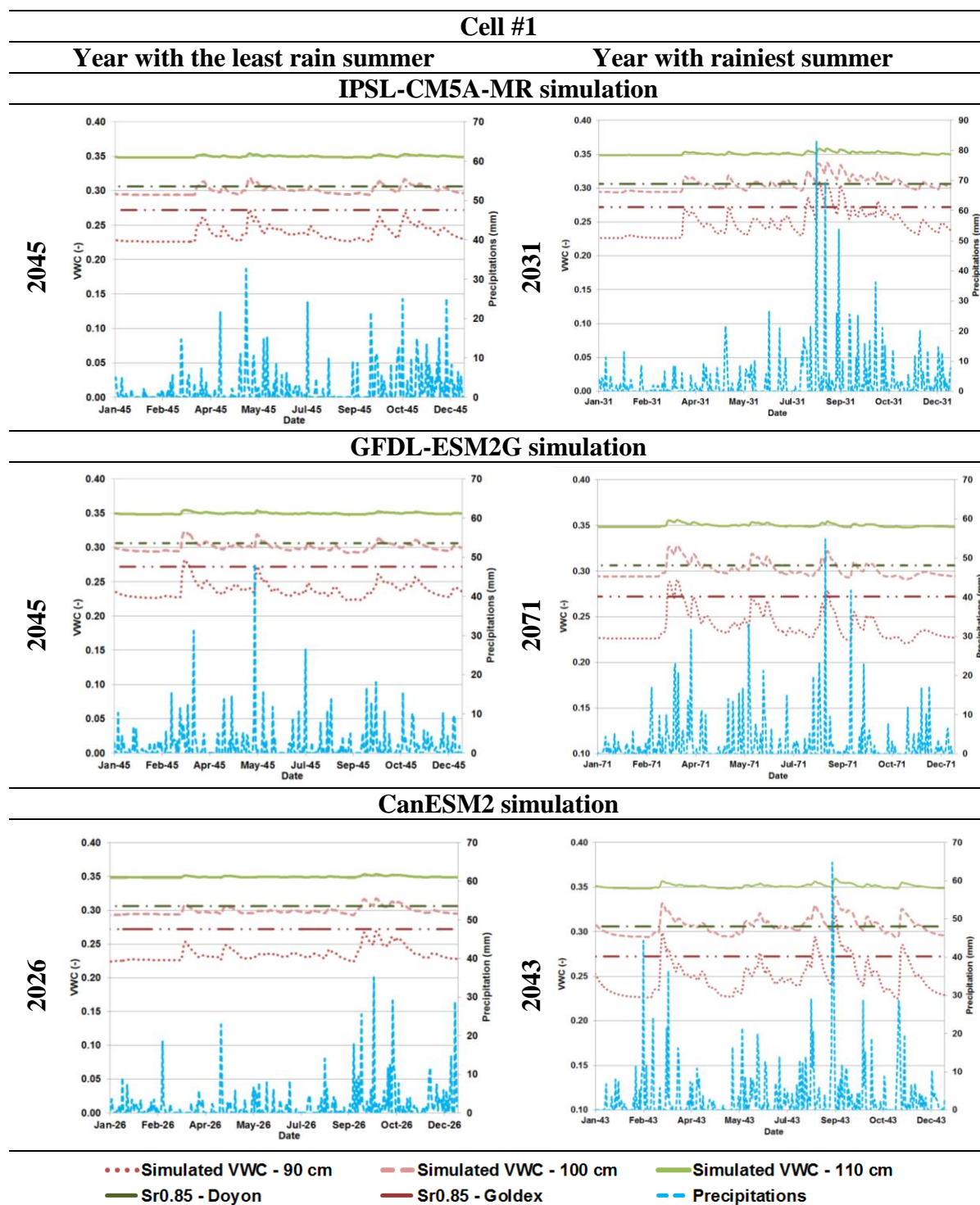


Figure 5.8 : Volumetric water content (VWC) evolution for cell #1 for the year with the least rain and the rainiest summer for the selected climate scenarios

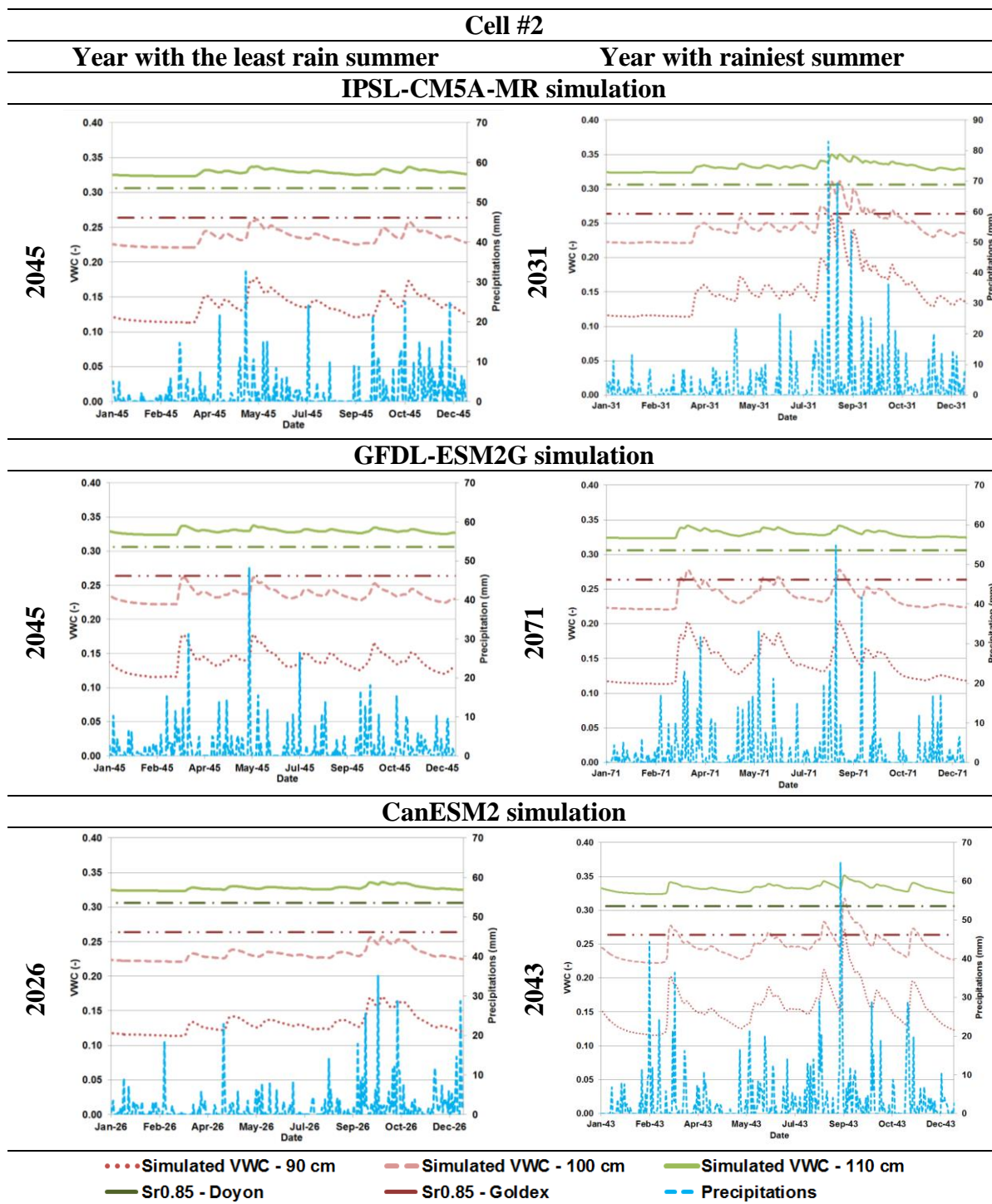


Figure 5.9 : Volumetric water content (VWC) evolution from cell #2 for the year with the least rain and the rainiest summer for the selected climate scenarios



### 5.5.2 Application to the tailings pond

A numerical model representing a simplified representation (1D) of the tailing ponds of Doyon-Westwood was simulated with the configuration of the planned reclamation to evaluate climate change effect on the efficiency of the reclamation method over the long term (up to 2100). The case of the pond #2 was used in the numerical model, with a mean thickness of Doyon tailings of 7 m. Calibrated properties of Doyon tailings obtained for the field cells were used. The initial water level was defined at 0.9 m ( $\frac{1}{2}$  AEV) below the interface between the cover and the Doyon tailings (Figure 5.10). The effect of cover thickness and materials properties were tested.

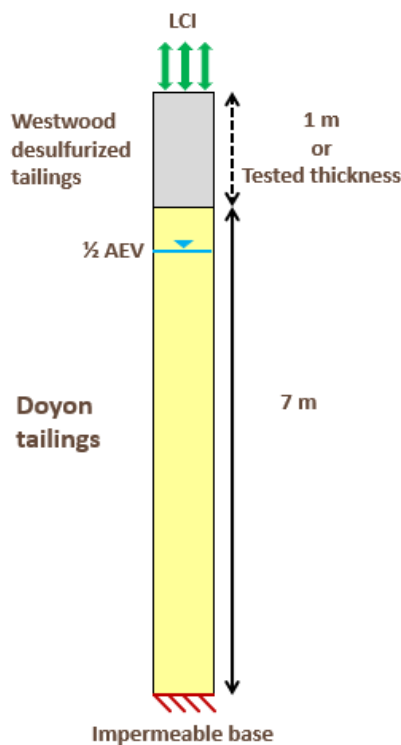


Figure 5.10 : Schematic representation of numerical model of tailing pond #2 of Doyon-Westwood

#### 5.5.2.1 Effect of cover thickness

A simulation with one meter of Westwood tailings using laboratory properties ( $n=0.41$ ) were used. The cover thickness was subsequently varied to evaluate the effect of this parameter on the efficiency of the reclamation method considering climate change. Simulations were performed with the worst case climatic scenario (IPSL-CM5A-MR).

In the case of the configuration with a 1 m monolayer cover (Figure 5.11a), the water level decreased below the  $\frac{1}{2}$  AEV level 47% of the time, every year between spring and autumn. Among the values below the  $\frac{1}{2}$  AEV, the mean water level was -0.5 m for 2020-2030 and decreased to -0.8 m for 2090-2100. The minimum value achieved by the water level was -1.4 m in July 2085. In parallel, the degree of saturation of Doyon tailings decreased below 85% only 20% of the time, meaning that the efficiency criterion of the reclamation method was not constantly met during the entire period.

The thickness of the monolayer cover was increased to verify the effect of cover thickness on the efficiency of the reclamation method. Optimized value for modeled conditions of the cover thickness was defined at 2.1 m (Figure 5.11b). With a 2.1 m cover, the water level had the same behaviour as described for the case with a 1 m monolayer cover, but the degree of saturation remained above 85% for all time up to 2100. The increase of the cover thickness at 2.1 m prevented desaturation of Doyon tailings even in the case of the least favorable climate scenario over the modeled time period.

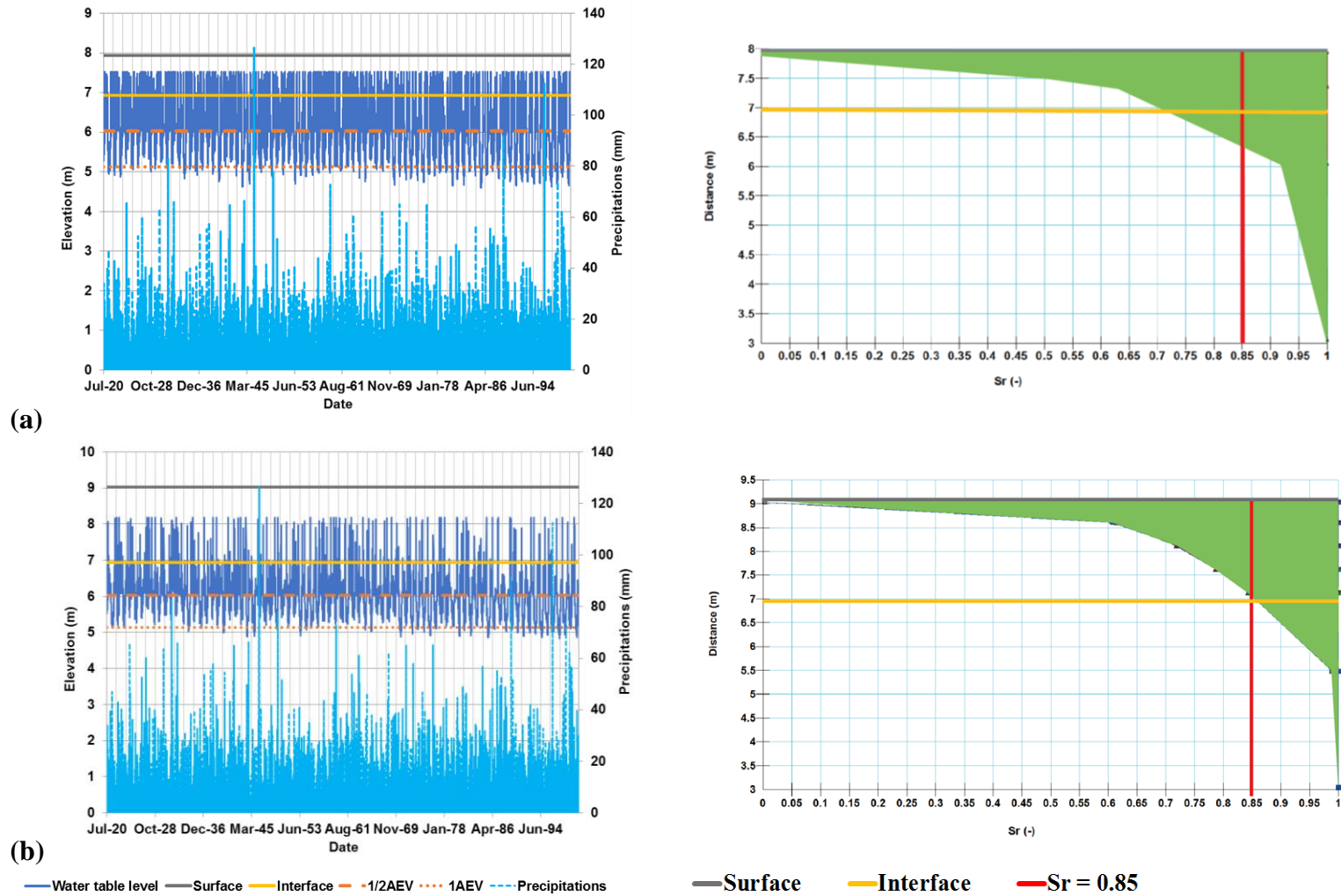


Figure 5.11 : Water table level and precipitations (left) and degree of saturation (right) evolution from 2020 to 2100 with IPSL-CM5A-MR scenario: Monolayer cover = 1 m (a) or 2.1 m (b)

### 5.5.2.2 Effect of material properties

Several transient-state simulations were performed by adjusting hydrogeological parameters of the Westwood tailings to consider the possible heterogeneity of tailings (variations in process, segregation during deposition, etc.) and their influence on the behaviour of a 1 m cover until 2100. Table 4 presents the material properties that were used for the subsequent simulations. Porosity was slightly decrease compared to the value tested in laboratory (for WRC) and AEV was lowered to 1.3 m. Saturated hydraulic conductivity remained similar.

Tableau 5.4 : Laboratory (LV) and tested (TV) values of Westwood tailings.

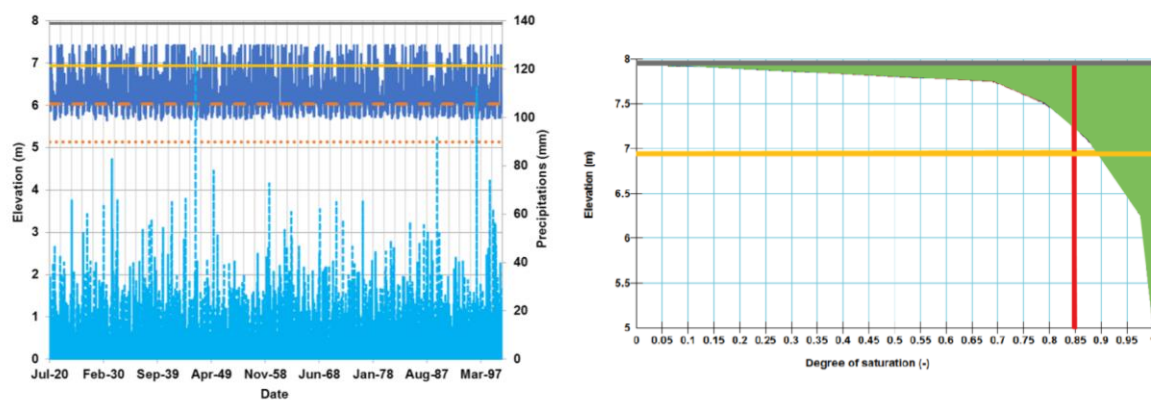
Tailings		Westwood	
		LV	TV
$n \ \& \ \theta_s$	(-)	0.41	0.38
$\theta_r$	(-)	0.08	0.02
$\alpha_{vG}$	(m <sup>-1</sup> )	0.16	0.37
$n_{vG}$	(m <sup>-1</sup> )	2.18	1.54
$k_{sat}$	(m.s <sup>-1</sup> )	$3.7 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^{-7}$
$AEV$	(m)	2.8	1.3

Results of the evolution of the water table and the degree of the saturation from 2020 to 2100 are presented in Figure 5.12 for the three selected climate scenarios. In the three climate scenarios, although the water level came down below the ½ AEV value, the base of the monolayer cover and the first meters of Doyon tailings below the interface remained above a degree of saturation of 85% over the entire period from 2020 to 2100. The water level came down to a maximum of 0.4 m below the ½ AEV value for the third climate scenario. At this value the diffusion of oxygen is expected to be limited enough to prevent the oxidation of sulfides and consequently the generation of AMD. For the three selected climate scenarios, the efficiency of the reclamation method was maintained over the long term. With these parameters for the Westwood tailings, the monolayer cover remained effective regardless of the climate scenario selected.

---

**IPSL-CM5A-MR simulation**

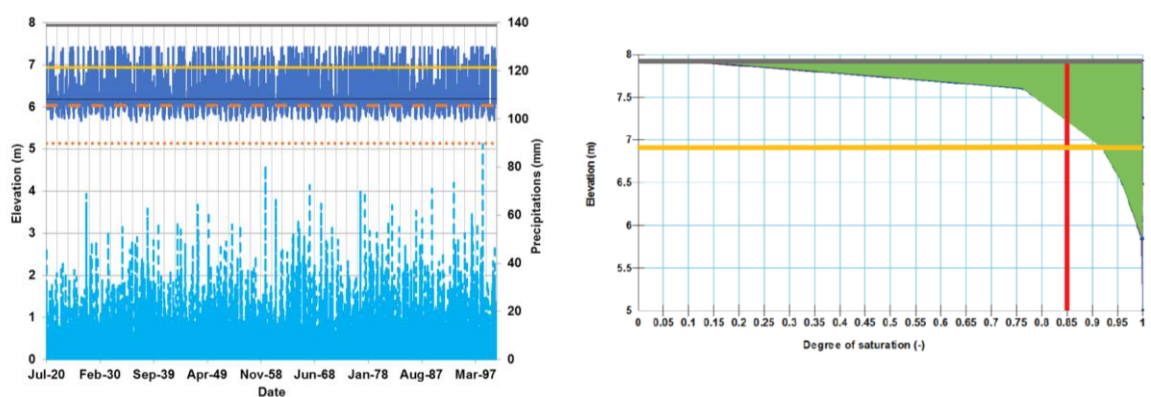

---




---

**GFDL-ESM2G simulation**

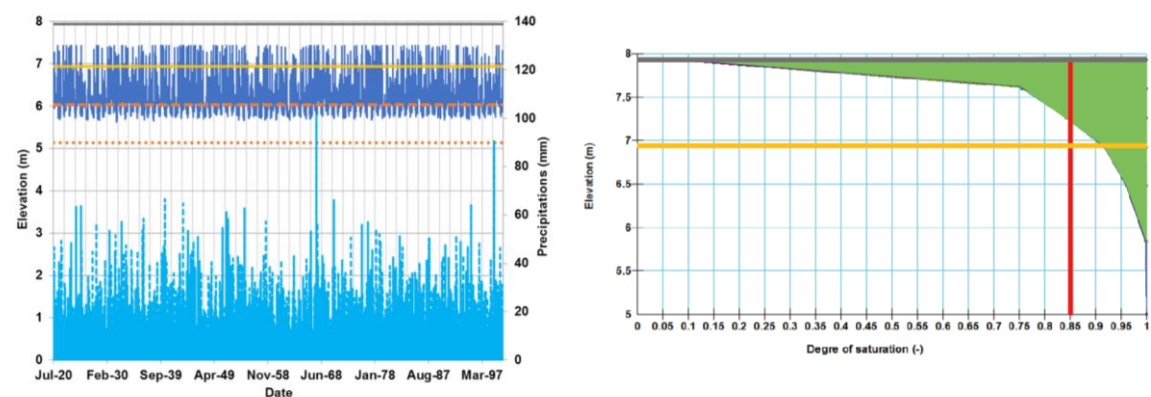

---




---

**CanESM2 simulation**


---



— Water table level — Surface — Interface — 0.5AEV — 1AEV — Precipitations —  $S_r = 0.85$

Figure 5.12 : Water table level and precipitations (left) and degree of saturation (right) evolution from 2020 to 2100 with selected climate scenarios

## 5.6 Discussion

Numerical modelling performed in this study allowed analyzing the performance of the monolayer cover combined with an EWT by varying different parameters (materials properties, water table level and cover thickness) as demonstrated in the past (Demers et al., 2008; Ethier et al., 2018a; Ouangrawa et al., 2010; Pabst et al., 2017a). The special feature of this paper is to study the influence of the climate parameters in a context of climate change. Results indicated that materials properties and water table level had more influence on the behaviour of the reclamation method than climate scenarios.

For this study, 1D numerical models were used to represent field cells and tailings ponds. As demonstrated in other studies (Bussière et al., 2007; Pabst et al., 2017a), this simplified representation is considered acceptable as a first approach to evaluate the effects of specific conditions or parameters. A 1D model can estimate correctly the hydrogeological behaviour of the reclamation method as demonstrated with the field cells model.

Some simplifications have been used with regards to material properties integrated in SEEP/W. The materials are considered homogeneous throughout their thickness, which is not the case in the field, whereas for example, segregation is created when the tailings and cover are deposited in the pond. The hysteresis effect, i.e. different WRC of the material in wetting or drainage phases, was not taken into account in the WRC used in the numerical models.

Calibration of the numerical model of field cells was not done over the winter period, however, the snow-covered data function of SEEP/W was used to ensure that the software took into account snow accumulation on the ground and its impact on water level during spring snowmelt. Consideration of these data had a minor impact on simulated water level data during spring (results not presented here; see Lieber, 2019 for details). The water table level increased more rapidly after snowmelt and reached higher values, but this difference was temporary and not critical to the performance of the cover system.

A total of 18 climate projections were obtained from nine climate models from CMIP5 and CORDEX. Some uncertainty surrounds the results of these climate projections such as natural climate variability, inaccuracies in climate models, greenhouse gas emissions, but also the post-treatment technique used. From these climate projections, three scenarios from different climate

models and RCPs were selected. The application of three different climate scenarios did not demonstrate much influence on the performance of the reclamation method in the case of the field cells and tailings ponds #2. However, it may not be the case for all monolayer cover with elevated water table configurations. The use of numerical modelling with climate change scenarios is seen as an important step to test the behaviour of the reclamation method for the future climate. Other materials may be more sensitive to climate change effects than the materials and configurations tested in this study.

## 5.7 Conclusion & Recommendations

The reclamation method proposed for the tailing ponds #2 and #3 of the Doyon-Westwood mine site is the monolayer cover combined with an EWT. The objective of this study was to test the influence of climate change on the long term hydrogeological behaviour of the reclamation method. A 1D numerical model representing experimental field cells was built with the software SEEP/W. The model was calibrated by adjusting hydrogeological parameters of cover and tailings and the initial water table level. Modeling results were validated by comparing simulation results of VWC with field measurements for transient state conditions during the cells field monitoring from 2015 to 2018.

Three different climate scenarios considering climate change from 2020 to 2100 were selected for the Val-d'Or region. The worst-case simulation combined a low precipitation variation (+3.5%) with a high temperature variation (+6.1°C) for the 2100 horizon. These climate scenarios were applied to the numerical model of experimental cells. A value of ½ AEV (cell #1) and 1 AEV (cell #2) were used to define the initial water table level. In this case, no significant influence was observed between different climate scenarios. The critical parameter was the water table level, in the case of cell #1; the cover-tailings interface remained saturated over the entire period 2020-2100. The efficiency of the method to limit the migration of oxygen within the generated tailings was maintained. In the case of cell #2, the interface did not remain saturated more than 90% of the time during the 2020-2100 period, which meant that the first centimeters of the Doyon tailings could potentially oxidize.

Another 1D model was built to represent the Doyon tailing ponds #2. The same climate scenario was applied to the numerical model to assess the impact of future climate conditions in a simplified

model of an existing tailings facility. For modeling conditions considered, a 1 m cover made of Westwood tailings was not sufficient to provide a constant degree of saturation above 85% when laboratory-measured material properties were input in the model. An increase in cover thickness to 2.1 m was shown to address climate change effects modeled by maintaining the  $S_r$  above 85%. Westwood cover material properties were found to influence significantly the efficiency of the reclamation method. Indeed with properties modified to  $n = 0.38$  and  $k_{sat} = 2.1 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ , the water level came down underneath the  $\frac{1}{2}$  AEV value at a maximum of -0.4 m. Despite this decrease, the degree of saturation remained above 85% in the base of the monolayer cover and in the Doyon tailings, adequately limiting the oxygen migration and therefore the generation of AMD.

In the case of the Doyon tailing ponds, climate change should have minimal impact on the efficiency of the reclamation method in the long term. However, it is a specific site and the performance was tested only until 2100. Tailings ponds and associated reclamation method are permanent infrastructures and, in this context, it is important to apply in the numerical models climate scenarios specific for the studied site, to evaluate the performance of the reclamation method in the long term.

## 5.8 Acknowledgements

The authors thank the Fonds de Recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT) and the Research Institute on Mines and the Environment (RIME) UQAT-Polytechnique for providing funding for this project. Additional support was also provided by the employees at URSTM-IRME who assisted with the laboratory and field work and Iamgold Corporation partner for the access to the Doyon-Westwood site. We also acknowledge the climate modeling research group WCRP for the free access to the CMIP results.

## 5.9 References

- Aachib, M., Mbonimpa, M., and Aubertin, M. 2004. Measurement and prediction of the oxygen diffusion coefficient in unsaturated media, with applications to soil covers. *Water, Air, and Soil Pollution* 156(1): 163-193.
- Aubertin, M., Bussière, B., and Bernier, L. 2002. *Environnement et gestion des rejets miniers*. Edited by P.I. Polytechnique.



- Aubertin, M., Bussière, B., James, M., Jaouhar, E., Martin, V., Pépin, N., Mbonimpa, M., and Chapuis, R. 2011. Vers une mise à jour des critères de stabilité géotechnique pour la conception des ouvrages de retenue de résidus miniers. In Symposium on mines and the environment, Rouyn-Noranda, QC. p. 38.
- Aubertin, M., Bussière, B., Pabst, T., James, M., and Mbonimpa, M. 2016. Review of the reclamation techniques for acid-generating mine wastes upon closure of disposal sites. In Geo-Chicago 2016. pp. 343-358.
- Aubertin, M., Chapuis, R., Aachib, M., Bussière, B., Ricard, J.-F., and Tremblay, L. 1995. Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers. No. 2.22.2a.
- Aubertin, M., Dionne, J., and Marcoux, L. 1997. Design guidelines and stability criteria of engineering works for water covers. In 4th ICARD, Vancouver, BC. pp. 1849–1866.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Demers, I., Aubertin, M., Fried, É., and Blier, A. 2008. Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada. *Minerals engineering* 21(4): 330-340.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Kongolo, M., McLaughlin, J., and Marion, P. 2000. Environmental desulphurization of four Canadian mine tailings using froth flotation. *International journal of mineral processing* 60(1): 57-74.
- Blier, A., Demers, I., Gagnon, M., and Bois, G. 2012. Eliminating acid rock drainage (ARD) at mine Doyon - sustained operations allow for new possibilities. In 9th International Conference on Acid Rock Drainage, Ottawa, Canada.
- Blowes, D., Ptacek, C., Jambor, J., Weisener, C., Paktunc, D., Gould, W., and Johnson, D. 2014. The geochemistry of acid mine drainage.
- Bussière, B., Aubertin, M., Mbonimpa, M., Molson, J.W., and Chapuis, R.P. 2007. Field experimental cells to evaluate the hydrogeological behaviour of oxygen barriers made of silty materials. *Canadian Geotechnical Journal* 44(3): 245-265.
- Bussière, B., Lelièvre, J., Ouellet, J., and Bois, D. 1995. Utilisation de résidus miniers désulfurés comme recouvrement pour prévenir le DMA: analyse technico-économique sur deux cas

- réels. In Sudbury'95, Conference on Mining and the Environment, Sudbury, ON. pp. 59-68.
- Charron, I. 2016. Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation, Édition 2016. Ouranos. p. 94.
- Cosset, G. 2009. Comportement hydrogéologique d'une couverture monocouche sur des résidus miniers sulfureux: Essais en colonne et simulations numériques. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- Cosset, G., and Aubertin, M. 2010. Physical and numerical modelling of a monolayer cover placed on reactive tailings. In Proceedings of the 63rd Canadian Geotechnical Conference & 1st Joint CGS/CNC-IPA Permafrost Specialty Conference, Calgary. pp. 12-16.
- Dagenais, A.-M., Aubertin, M., and Bussière, B. 2006. Parametric study on the water content profiles and oxidation rates in nearly saturated tailings above the water table. In Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD). p. 405420.
- Decagon Devices Inc. 2017. 5TM Water Content and Temperature Sensors. Pullman, WA, USA.
- Demers, I. 2008. Performance d'une barrière à l'oxygène constituée de résidus miniers faiblement sulfureux pour contrôler la production de drainage minier acide. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- Demers, I., Bussière, B., Benzaazoua, M., Mbonimpa, M., and Blier, A. 2008. Column test investigation on the performance of monolayer covers made of desulphurized tailings to prevent acid mine drainage. *Minerals Engineering* 21(4): 317-329.
- Demers, I., Bussière, B., Mbonimpa, M., and Benzaazoua, M. 2009. Oxygen diffusion and consumption in low-sulphide tailings covers. *Canadian Geotechnical Journal* 46(4): 454.
- Desjarlais, C., and Blondlot, A. 2010. Savoir s'adapter aux changements climatiques. Ouranos. p. 137.
- Dobchuk, B., Nichol, C., Wilson, G.W., and Aubertin, M. 2013. Evaluation of a single-layer desulphurized tailings cover. *Canadian Geotechnical Journal* 50(7): 777-792.

- Edwards, P.N. 2011. History of climate modeling. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 2(1): 128-139.
- Ethier, M., Bussière, B., Aubertin, M., Demers, I., Maqsoud, A., Dionne, J., and Roy, M. 2014. Results from a field investigation of the elevated water table technique combined with a monolayer cover on reactive tailings. In 67th Canadian Geotechnical Conference, Regina (Saskatchewan), Canada. p. 8.
- Ethier, M., Bussière, B., Aubertin, M., Maqsoud, A., Demers, I., and Broda, S. 2018a. In situ evaluation of performance of reclamation measures implemented on abandoned reactive tailings disposal site. Canadian Geotechnical Journal 55(12): 1742-1755. doi: 10.1139/cgj-2016-0699.
- Ethier, M., Bussière, B., Aubertin, M., Maqsoud, A., Demers, I., and Lacroix, R. 2013. In situ evaluation of the elevated water table technique combined with a monolayer cover on reactive tailings: monitoring strategy and preliminary results. In 66th Canadian Geotechnical Conference & 11th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, Montréal (Québec), Canada. p. 9.
- Ethier, M., Bussière, B., Broda, S., and Aubertin, M. 2018b. Three-dimensional hydrogeological modeling to assess the elevated-water-table technique for controlling acid generation from an abandoned tailings site in Quebec, Canada. Hydrogeology Journal: 1-19. doi: 10.1007/s10040-017-1713-y.
- Flato, G.M. 2011. Earth system models: an overview. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 2(6): 783-800. doi: 10.1002/wcc.148.
- Fredlund, D., and Xing, A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal 31(3): 521–532. doi: 10.1016/0148-9062(95)96992-K.
- Geo-Slope International Ltd. 2017. Heat and mass transfer modeling with GeoStudio 2018.
- Giorgi, F., Jones, C., and Asrar, G.R. 2009. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. World Meteorological Organization (WMO) Bulletin 58(3): 175.

- Lieber, E. 2019; in progress. Influence des facteurs climatiques sur la performance de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche. In RIME. UQAT, Rouyn-Noranda, QC, Canada. p. 233.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Aachib, M., and Bussière, B. 2003. Diffusion and consumption of oxygen in unsaturated cover materials. *Canadian Geotechnical Journal* 40(5): 916-932.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Chapuis, R., and Bussière, B. 2002. Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotechnical & Geological Engineering* 20(3): 235-259. doi: 10.1023/A:1016046214724.
- MEND. 2001. Prevention and control MEND 5.4.2d. MEND.
- Monette, A. 2012. L'étude des changements appréhendés des précipitations extrêmes sur la province du Québec en utilisant un ensemble de multi-MRC. UQAM.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., and Kram, T. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463(7282): 747-756.
- Nicholson, R.V., Gillham, R.W., Cherry, J.A., and Reardon, E.J. 1989. Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal* 26(1): 1-8.
- Nordstrom, D.K., Blowes, D.W., and Ptacek, C.J. 2015. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update. *Applied Geochemistry* 57: 3-16.
- Ouangrawa, M., Aubertin, M., Molson, J., Bussière, B., and Zagury, G. 2010. Preventing Acid Mine Drainage with an Elevated Water Table: Long-Term Column Experiments and Parameter Analysis. *Water, Air, & Soil Pollution* 213(1-4): 437-458. doi: 10.1007/s11270-010-0397-x.
- Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Bussière, B., and Zagury, G. 2009. Reactive transport modelling of mine tailings columns with capillarity-induced high water saturation for preventing sulfide oxidation. *Applied Geochemistry* 24(7): 1312-1323. doi: 10.1016/j.apgeochem.2009.04.005.

- Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Zagury, G., and Bussière, B. 2006. The effect of water table elevation on acid mine drainage from reactive tailings: a laboratory and numerical modeling study. In 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), St. Louis, Mo. pp. 26-30.
- Pabst, T., Aubertin, M., Bussière, B., and Molson, J. 2014. Column tests to characterise the hydrogeochemical response of pre-oxidised acid-generating tailings with a monolayer cover. *Water, Air, & Soil Pollution* 225(2): 1841.
- Pabst, T., Aubertin, M., Bussière, B., and Molson, J. 2017a. Experimental and numerical evaluation of single-layer covers placed on acid-generating tailings. *Geotechnical and Geological Engineering* 35(4): 1421-1438. doi: 10.1007/s10706-017-0185-0.
- Pabst, T., Molson, J., Aubertin, M., and Bussière, B. 2017b. Reactive transport modelling of the hydro-geochemical behaviour of partially oxidized acid-generating mine tailings with a monolayer cover. *Applied Geochemistry* 78: 219-233. doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.01.003.
- Piani, C., Weedon, G., Best, M., Gomes, S., Viterbo, P., Hagemann, S., and Haerter, J. 2010. Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology* 395(3): 199-215.
- Plummer, D., Caya, D., Frigon, A., and Côté, H. 2006. Climate and Climate Change over North America as Simulated by the Canadian RCM. *Journal of Climate* 19(13): 3112-3132.
- Rey, N.J., Demers, I., Bussière, B., Mbonimpa, M., and Lortie, S. 2016. Field experiments to test the elevated water table concept combined with a desulfurized tailings cover layer. In *Geo-Chicago 2016*, Chicago, USA. pp. 289-298.
- Rey, N.J., Demers, I., Bussière, B., Mbonimpa, M., and Lortie, S. 2017. Laboratory and field study of oxygen flux and hydrogeological behaviour of monolayer covers made of low-sulfide tailings combined with an elevated water table placed over acid-generating mine tailings. In *Geo-Ottawa 2017*, Ottawa (Ontario), Canada.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., and Rafaj, P. 2011. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 109(1-2): 33.

- Romano, C.G., Ulrich Mayer, K., Jones, D.R., Ellerbroek, D.A., and Blowes, D.W. 2003. Effectiveness of various cover scenarios on the rate of sulfide oxidation of mine tailings. *Journal of Hydrology* 271(1-4): 171-187. doi: 10.1016/s0022-1694(02)00348-7.
- Roy, P. 2015. Synthèse des changements climatiques pour le secteur minier. Ouranos. p. 55.
- Senes. 1996. Review of use of an elevated water table as a method to control and reduce acidic drainage from tailings. MEND. MEND Report 2.17.1. p. 165.
- Sjöberg, B., Wilson, G., and Aubertin, M. 2001. Field and laboratory characterization of a desulphurized tailings cover system. In 54th Canadian Geotechnical Conference, Calgary, AB.
- Taylor, K., Stouffer, R., and Meehl, G. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(4): 485-498.
- Teutschbein, C., and Seibert, J. 2012. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology* 456: 12-29.
- Thomson, A.M., Calvin, K.V., Smith, S.J., Kyle, G.P., Volke, A., Patel, P., Delgado-Arias, S., Bond-Lamberty, B., Wise, M.A., and Clarke, L.E. 2011. RCP4. 5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic change* 109(1-2): 77.
- URSTM. 2017. Analyse de risques et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois. UQAT. p. 122.
- Villeneuve, C., and Richard, F. 2007. Vivre les changements climatiques réagir pour l'avenir. Nouv. éd. rev. et augm. ed. Éditions MultiMondes, Sainte-Foy, Québec.

## CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE

Dans l'article présenté au chapitre précédent, les résultats ont démontré que la performance de la méthode de restauration du recouvrement monocouche combinée à la nappe phréatique sur le site Doyon-Westwood dans le cas du parc #2 devrait être maintenue à l'horizon 2100 dans le cas de trois scénarios climatiques différents appliqués aux modèles numériques. Les résultats présentés dans l'article démontrent que les paramètres hydrogéologiques des matériaux ont l'impact le plus significatif sur le comportement hydrogéologique du système. L'épaisseur du recouvrement a aussi un impact sur le comportement, tandis que les projections climatiques ont une influence moindre.

D'autres facteurs peuvent cependant influencer les résultats de la modélisation numérique. Ce chapitre présente donc des résultats complémentaires qui prennent en compte l'influence d'autres paramètres, soit le niveau initial de la nappe phréatique et les paramètres de la fonction Interaction sol-climat de SEEP/W (fonctions « Épaisseur de neige » et valeur de l'albédo). Le modèle numérique utilisé dans le cadre de cette étude paramétrique et dans lequel les paramètres ont été modifiés, est celui représentant le parc à résidus #2 avec 1 m de recouvrement monocouche Westwood ( $n=0.38$ ) et les données climatiques du scénario IPSL-CM5A-MR\_RCP8.5 de 2020 à 2100. Ce modèle sera appelé « modèle de base » dans la suite de ce chapitre.

### 6.1 Niveau initial de la nappe phréatique

Le niveau initial de la nappe phréatique a été défini dans les modèles numériques utilisés dans cette étude comme étant égale à la valeur de  $1/2$ PEA des résidus Doyon (0.9 m sous la surface des résidus Doyon ou 6.03 m à partir de la base du modèle). Cette valeur a été définie comme étant un critère de design plus conservateur et sécuritaire que la valeur théorique de 1PEA (Ouangrawa (2007), voir section 2.5.4). Cependant, c'est lorsque la succion atteint la valeur de 1PEA qu'un matériau commence à se désaturer théoriquement. Une valeur initiale de la nappe phréatique correspondant à 1PEA (1.8 m sous la surface des résidus Doyon ou 5.13 m à partir de la base du modèle) a donc été appliquée au modèle de base afin de comparer l'évolution du niveau de la nappe ainsi que le degré de saturation par rapport à une valeur initiale de  $1/2$  PEA.

Pour cette comparaison, deux années présentant des résultats représentatifs ont été sélectionnées. Pour sélectionner ces années, le cumul des précipitations de juin à septembre a été calculé pour chaque année afin de déterminer l'année présentant l'été le plus pluvieux et le moins pluvieux. Sur

la période 2020-2100 pour la simulation climatique IPSL-CM5A-MR\_RCP8.5, l'été de l'année 2045 est le moins pluvieux avec un cumul de 200 mm alors que l'année 2031 présente l'été le plus pluvieux avec un cumul de 655 mm.

La figure 6.1 présente l'évolution du niveau de la nappe phréatique pour les années sélectionnées. La simulation du modèle dont le niveau initial de la nappe est défini à  $\frac{1}{2}$  PEA (ligne bleu) et comparé à celle du modèle à 1 PEA (pointillé vert). Le comportement du modèle à 1 PEA est similaire au modèle à  $\frac{1}{2}$  PEA mais présente des fluctuations plus faibles. Le niveau de la nappe à  $\frac{1}{2}$  PEA étant plus proche de la surface, il subit plus les effets de l'évaporation. Pour le modèle 1 PEA, en 2031 (figure 6.1a), le niveau de la nappe s'est maintenu au-dessus de 1 PEA (été le plus pluvieux). Les résidus Doyon sont donc demeurés en théorie entièrement saturé. En 2045 (été le moins pluvieux), le niveau de la nappe s'est maintenu en dessous de 1 PEA tout au long de l'été. Comme pour les résultats présentés au chapitre 5, l'étape suivante consiste à analyser le degré de saturation pour statuer de la performance du recouvrement.

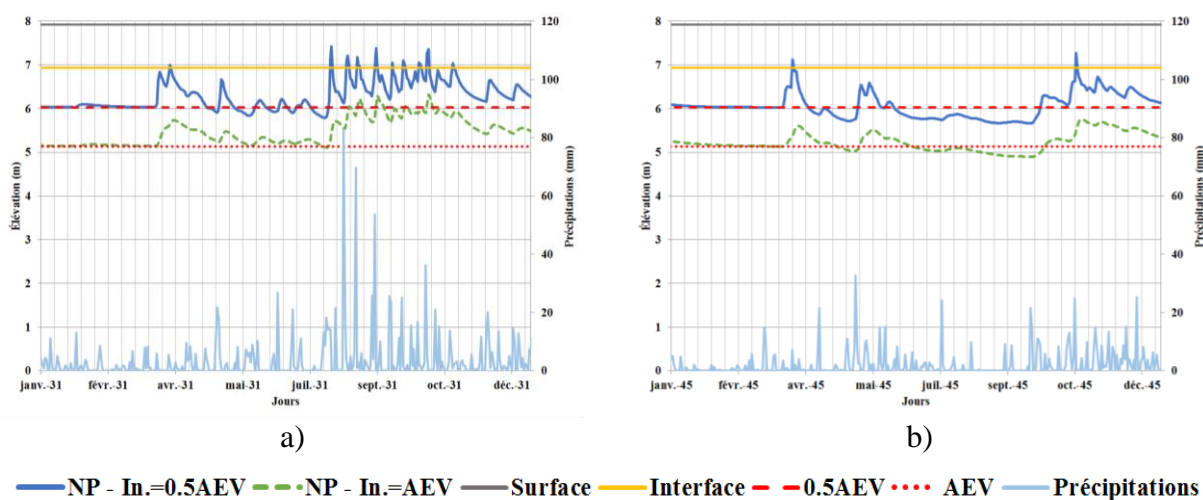


Figure 6.1 : Comparaison de la modélisation du niveau de la nappe phréatique selon la valeur initiale du niveau de la nappe phréatique ( $\frac{1}{2}$  PEA ou 1 PEA): a) 2031 et b) 2045.



La figure 6.2 présente l'évolution du degré de saturation dans le recouvrement et les deux premiers mètres des résidus Doyon (depuis la surface) pour le modèle à 1 PEA et ½ PEA pour les années 2031 et 2045. Le degré de saturation de la totalité des résidus Doyon est demeuré supérieur à 85% durant toute la période dans le cas des deux modèles. Ces valeurs étaient cependant plus faibles dans le cas du modèle à 1 PEA ( $S_r$  min = 85,7%) que dans celui à ½ PEA ( $S_r$  min = 92,2%).

Dans le cas du modèle à ½ PEA, pour les deux années, au minimum les 40 premiers centimètres depuis la base du recouvrement sont demeurés à un degré de saturation supérieur à 85%. La base du recouvrement (au niveau de l'interface recouvrement-résidus) a atteint un  $S_r$  minimum de 91.2% en 2045 et de 92.7% en 2031. Dans le cas du modèle à 1 PEA, durant l'année 2031, le degré de saturation de la base du recouvrement est demeuré supérieur à 85% ( $S_r$  min = 87,4%). En revanche, durant l'année 2045 (été le moins pluvieux), le niveau de la nappe phréatique a été inférieur à la valeur de 1 PEA du 7 juin au 2 octobre (118 jours). Le degré de saturation à la base du recouvrement a atteint des valeurs minimales de 84.7% du 3 au 26 septembre (24 jours). Théoriquement, le coefficient de diffusion effectif  $D_e$  sera de quelques ordres de grandeur supérieur à  $D_w$ , donc la migration de l'oxygène sera moins limitée que souhaitée pendant cette période. Cependant, le degré de saturation des résidus Doyon demeure supérieur à 85%, donc tant que les résidus demeurent à un degré de saturation élevé, leur oxydation sera limitée. Même si le niveau de la nappe phréatique est demeuré en dessous de la valeur de 1 PEA pendant une longue période (118 jours), et bien que la base du recouvrement ait pu atteindre un  $S_r$  en dessous de 85%, celui à la surface des résidus Doyon est demeuré supérieure à 85% en tout temps. Ceci démontre la résilience du système de recouvrement monocouche avec nappe phréatique surélevée dans des périodes climatiques défavorables dans le cas du parc #2 Doyon-Westwood pour des conditions de modélisation et une période de temps définies.

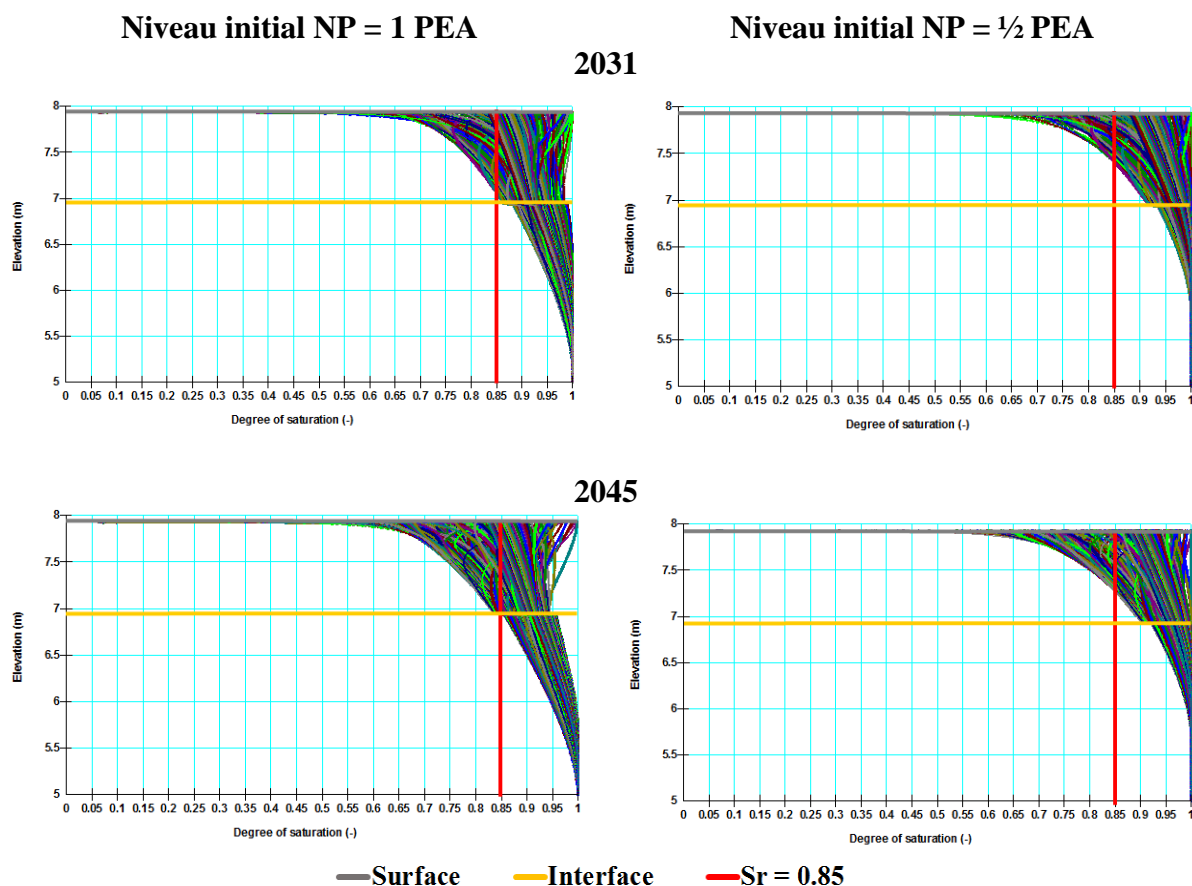


Figure 6.2 : Modélisation du degré de saturation selon la valeur initiale du niveau de la nappe phréatique (1/2 PEA ou 1 PEA) appliquées au modèle numérique en 2031 et 2045.

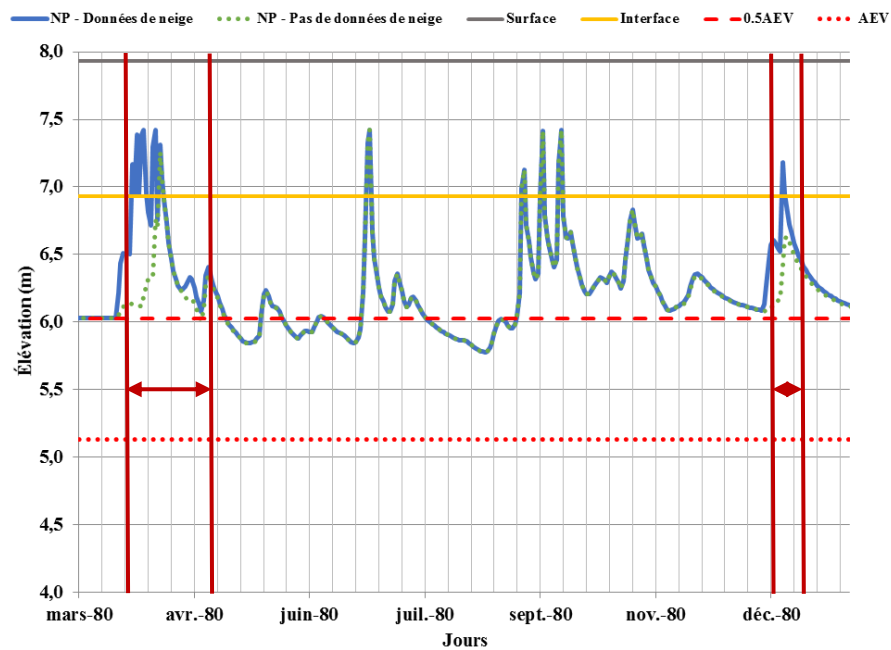
## 6.2 Données de neige

La quantité de neige au sol peut être estimée par SEEP/W à partir de plusieurs facteurs afin de prendre en compte ou non la fonte des neiges dans la modélisation (voir section 2.8.2.3). Cette fonctionnalité a été utilisée dans les modélisations numériques réalisées aux chapitres précédents, en utilisant les valeurs théoriques appliquées par défaut par le logiciel. Afin de voir l'impact de cette fonction sur la simulation du niveau de la nappe phréatique dans les résidus, une simulation numérique ne prenant pas en compte les données de neige a été réalisée sur le modèle de base.

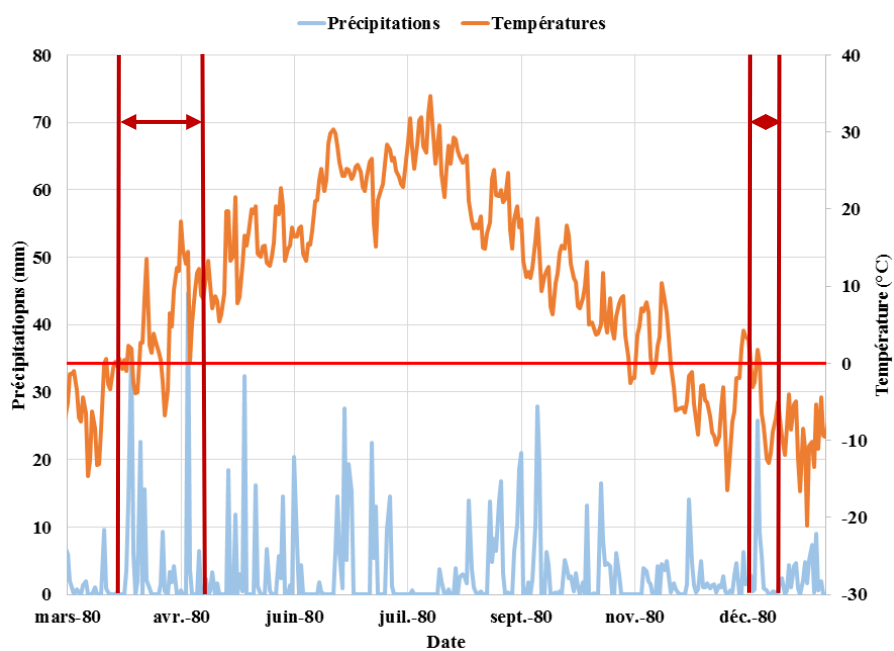
Sur la période de simulation (2020-2100), en comparaison avec le modèle de base, la différence du niveau de la nappe phréatique varie entre -0,2 m et -1,5 m lorsque les données de neige ne sont pas prises en compte. Ces différences sont observées chaque année sur la période de simulation, généralement entre les mois de novembre et de mai. Des différences supérieures à 1 m sont

observées lors du printemps généralement durant les mois de mars et d'avril (52/80 années). Mais des différences significatives peuvent également s'observer à l'automne ou même durant l'hiver. Les figures 6.3 et 6.4 présentent deux années où des différences maximales ont été observées, soit 1.3 m en 2075 et 1.5 m en 2080. Le premier graphique présente la différence du niveau de la nappe phréatique entre le modèle de base avec données de neige (ligne bleu) et le modèle sans données de neige (ligne pointillé verte). Le second graphique présente en parallèle le régime de températures et de précipitations pour la même période. Le niveau de la nappe simulée par les deux modèles diffère au printemps pour les deux années. Dès que la température a atteint une valeur positive, le modèle avec les données de neige a simulé un niveau de nappe qui a augmenté immédiatement. Le niveau de la nappe est demeuré à une position plus élevée plus rapidement et plus longtemps que dans le cas du modèle sans données de neige. Au courant de l'automne 2080 (figure 6.3), un phénomène similaire a pu être observé lorsque les températures sont repassées au-dessus du point de congélation après une période où la température est demeurée négative. Cette différence était encore plus visible au courant de l'hiver 2075 (figure 6.4) où plusieurs périodes de redoux ont eu pour incidence une modélisation différente de la nappe phréatique entre les deux modèles.

Cette comparaison permet de montrer qu'en appliquant la fonction « Données de neige » au modèle numérique, celui-ci prendra en compte lors du printemps ou des épisodes de redoux, durant l'automne ou l'hiver, l'approvisionnement de la nappe phréatique par la fonte de la neige pendant ces périodes. La représentation de l'évolution du niveau phréatique sera donc plus proche de la réalité pendant ces périodes. Dans le cas de l'étude de la méthode de restauration de la nappe phréatique surélevée, l'utilisation de la fonction « Données de neige » permet d'obtenir une simulation plus représentative de la fluctuation de la nappe phréatique et ainsi une meilleure estimation de la performance de la méthode pendant les périodes de fontes des neiges. Une analyse du régime thermique permettrait de vérifier ces observations.

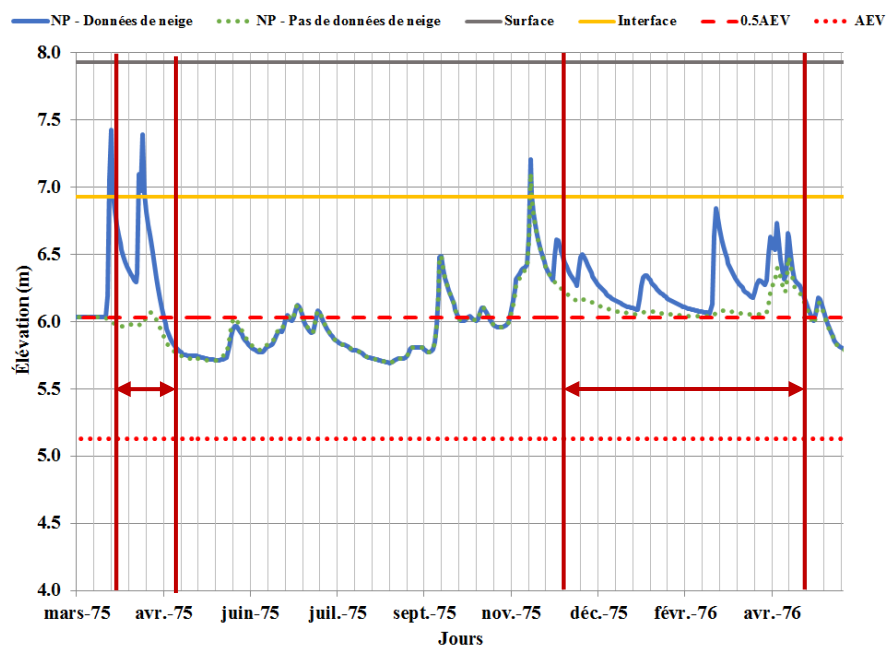


a)

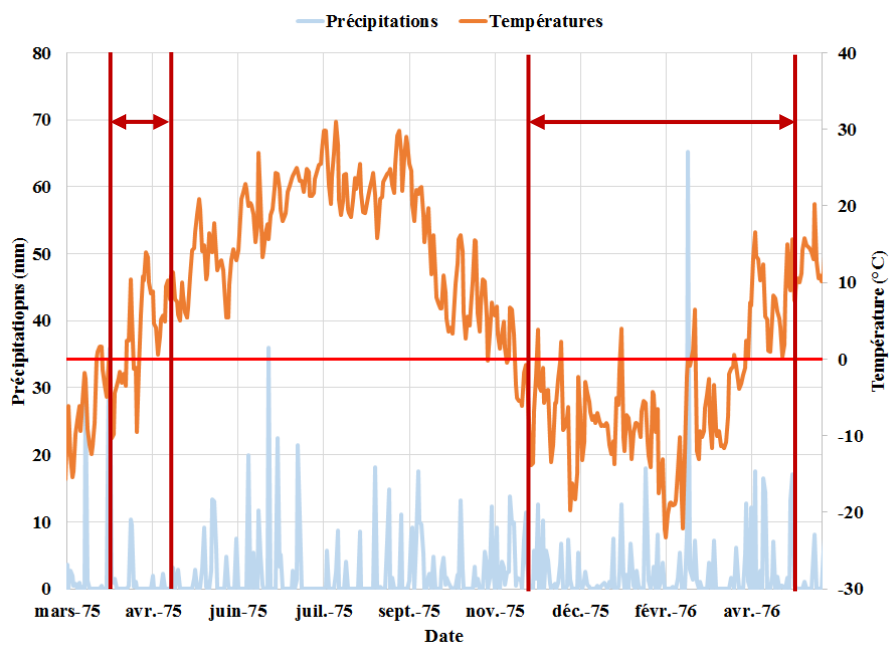


b)

Figure 6.3 : Impact de l'utilisation de la fonction « Données de neige » (2080) : a) Évolution du niveau de la nappe phréatique et b) Évolution des températures et précipitations



a)



b)

Figure 6.4 : Impact de l'utilisation de la fonction « Données de neige » (2075-2076) : a) Évolution du niveau de la nappe phréatique et b) Évolution des températures et précipitations.

### 6.3 Albédo

La valeur de l'albédo doit être intégrée au modèle numérique afin de permettre au logiciel d'estimer la valeur du rayonnement solaire (voir section 2.8.2.2). Pour rappel, les valeurs théoriques d'albédo choisies sont respectivement de 0,8 pour la présence de neige fraîche, 0,5 pour la présence de neige au sol et 0,1 pour un sol nu dans le modèle de base. Une valeur d'albédo journalière est indiquée pour la période 2020-2100. Pour cette étude paramétrique, les valeurs d'albédo variable utilisées dans le modèle de base ont été remplacées par une valeur unique d'albédo égal à 0,1.

Sur la période 2020-2100, la simulation journalière du niveau de la nappe phréatique ne montre que peu de différence entre les deux modèles (15% des résultats). La figure 6.5 présente la comparaison entre l'évolution du niveau de la nappe phréatique du modèle de base (albédo variable) en bleu et le modèle avec un albédo fixe journalier (0,1) en pointillé vert, pour les années 2031 et 2059 où les différences minimales et maximales sur l'ensemble de la période ont été observées. La différence minimale observée est de 12 cm observé en juin 2031 (figure 6.5a) et la différence maximale est de -35 cm observé en mai 2059 (figure 6.5b). Pour les deux années présentées, les résultats obtenus à partir des deux simulations sont similaires à l'exception de différences ponctuelles et minimes décrites précédemment. En conclusion, dans le cas de la modélisation de la méthode de restauration de la nappe phréatique surélevée, la prise en compte de valeurs d'albédos différents selon la présence ou non de neige au sol (sol nu ou sol enneigé) n'a pas d'impact significatif sur la modélisation du niveau de la nappe phréatique par SEEP/W.

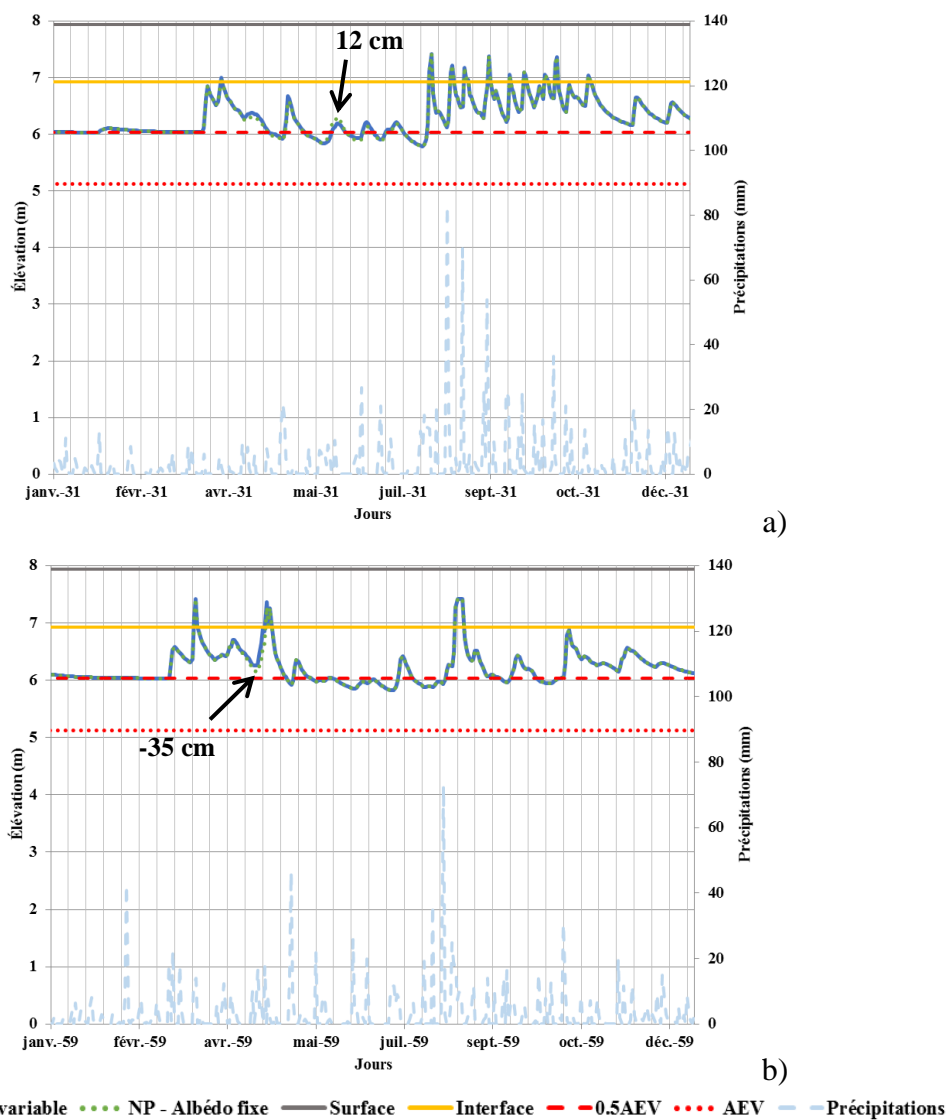


Figure 6.5 : Comparaison de la modélisation du niveau de la nappe phréatique selon les valeurs d'albédo appliquées au modèle numérique : a) 2031 et b) 2059.

## CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

### 7.1 Sommaire

L'exploitation des minéraux a toujours généré des volumes plus ou moins importants de rejets miniers n'ayant pas ou peu de valeurs économiques. Pouvant représenter une source de contamination pour l'environnement, ils doivent être stockés dans des structures permanentes. Les résidus miniers générés à la fin du cycle de traitement du minerai sont entreposés dans des parcs à résidus afin de limiter les exfiltrations vers les eaux de surface et souterraine. Ces exfiltrations peuvent être une source de contamination dans le cas où les résidus contiennent toujours une quantité de sulfures. La réaction chimique des sulfures avec l'eau et l'oxygène est responsable du DMA.

Des méthodes de restauration peuvent être mises en place de manière progressive ou à la fin de la vie utile du parc à résidus. Par ces méthodes, l'un des composants de l'équation chimique soit l'eau, l'oxygène ou les sulfures eux-mêmes est contrôlé, ce qui limite la génération d'acide par les résidus. Dans des climats tempérés, comme dans la partie méridionale du Québec, le type de méthodes à privilégier a pour but de limiter la migration de l'oxygène à travers les résidus grâce à la présence de l'eau. Ce phénomène se produit car le coefficient de diffusion de l'oxygène et concentration maximale en oxygène dissous dans l'eau sont plus faibles dans l'eau que dans l'air. La migration de l'oxygène est alors limitée dans un matériel saturé ou proche de la saturation. L'une des méthodes basée sur ce fait est la technique de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche. Grâce à cette technique le niveau de la nappe phréatique peut être maintenu à une profondeur optimale. Le phénomène de remontée capillaire permettra alors à l'intégralité de l'épaisseur de résidus situés au-dessus de la nappe de demeurer proches de la saturation. La hauteur de la remontée capillaire étant associée à la PEA, la profondeur optimale du niveau phréatique doit être inférieure à  $\frac{1}{2}$  PEA par rapport à la surface des résidus. Le recouvrement monocouche peut avoir diverses fonctions comme celle de barrière à l'évaporation ou à l'oxygène.

Les parcs à résidus sont des structures dont la durée de vie est permanente. La performance de cette méthode de restauration sera directement impactée par le bilan hydrique et en particulier par le régime de précipitations. Dans un contexte de changements climatiques, il est donc important de prendre en compte la variabilité de cette composante dans le design de la méthode de restauration.



Une augmentation des précipitations moyennes annuelles ainsi qu'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes de précipitations mais aussi de sécheresses sont attendus au Québec. Alors que l'augmentation de précipitations aura un impact positif sur la méthode de restauration, ce seront les périodes de sécheresses qui pourront la rendre moins efficace à limiter la génération de DMA pendant des périodes variables.

La résolution numérique de modèles climatiques, qui représentent les différentes composantes du globe terrestre, permet d'obtenir différentes simulations climatiques futures. Ses simulations permettent de prendre en compte la variabilité de différents paramètres et en particulier différentes évolutions possibles de la quantité d'émissions de GES appelés scénarios RCP. Une technique de post-traitement est alors utilisée afin d'obtenir des scénarios climatiques qui rassemble l'évolution de différents paramètres comme la température et les précipitations sur une période futur (ici de 2020 à 2100). Dans le cadre de ces travaux de recherche, trois scénarios climatiques différents ont été utilisés afin de simuler leur impact sur le comportement de la méthode de restauration : un scénario ayant un impact négatif sur bilan hydrique, c'est-à-dire présentant peu de précipitations et une forte augmentation des températures (IPSL-CM5A-MR); un scénario représentant une forte augmentation des précipitations et une faible augmentation des températures (GFDL-ESM2G); et un scénario représentant des augmentations moyennes entre les valeurs des deux scénarios précédents (CanESM2).

L'influence des changements climatiques sur la méthode de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche a été étudiée dans le cadre de ces travaux sur le cas du site minier Doyon-Westwood (Cadillac, Québec). La restauration des parcs à résidus #2 et #3 de Doyon est prévu avec un recouvrement monocouche, composée de résidus désulfurés Westwood, combiné à une nappe phréatique surélevée. Des travaux de laboratoire et de modélisation ont permis de définir les paramètres de conception préliminaires pour le design de la méthode de restauration. Des travaux de terrain subséquents ont eu pour objectif de tester la méthode de restauration à une échelle intermédiaire. Des cellules de terrain ont été érigés sur le site afin de tester l'influence de différents paramètres (en particulier le niveau de la nappe phréatique) et d'étudier la performance du système sur plusieurs années (2015-2017) grâce à un suivi hydrogéologique et géochimique.

Ces cellules de terrain ont été la prémisse des travaux de recherche effectués dans le cadre de cette étude. Une caractérisation en laboratoire ( $CRE$  et  $k_{sat}$ ) des matériaux utilisés pour la construction des cellules a permis de confirmer les résultats obtenus précédemment en 2015. Le suivi hydrogéologique et géochimique des cellules a également été prolongé en 2018.

Les cellules de terrain ont été modélisées numériquement en 1D en utilisant les propriétés des matériaux définies en laboratoire et les données météorologiques actuelles. La calibration a permis d'ajuster les paramètres des matériaux ( $CRE$  et  $k_{sat}$ ) afin de reproduire numériquement les données de suivi de terrain (TEV) entre 2015 et 2018. À la suite de cette étape, les conditions climatiques annuelles moyennes prédites, selon les trois scénarios climatiques, ont été intégrées au modèle numérique afin de simuler l'évolution de la TEV dans les cellules jusqu'en 2100. Ces résultats ont démontré l'impact principal du niveau de la nappe phréatique. La position initiale de la nappe à  $\frac{1}{2}$  PEA permet de maintenir les résidus Doyon complètement saturés sur toute la période d'observation (2020-2100), ce que ne permet pas un niveau de la nappe à 1 PEA. L'application de données issues de scénarios climatiques différents n'a pas montré d'impact majeur sur le comportement de la méthode de restauration. Cependant, en comparant ces résultats avec ceux obtenus avec les données de changements climatiques simplifiés (Chapitre 4), on observe que l'utilisation de réels scénarios climatiques permet d'obtenir des résultats plus réalistes sans surestimer les effets négatifs d'une période de sécheresse plus ou moins arbitraire par exemple.

Afin de vérifier ces résultats dans le cas d'un autre modèle, un modèle numérique 1D représentant cette fois-ci le parc à résidus #2 de Doyon-Westwood a été réalisé. Une première simulation a été effectuée afin de tester l'effet de l'épaisseur du recouvrement sur le comportement de la méthode de restauration. Le niveau phréatique initial a été défini à  $\frac{1}{2}$  PEA, et les données du scénario climatique le plus pessimiste (IPSL-CM5A-MR) ont été utilisées. Ces résultats ont démontré que dans le cas d'un recouvrement d'un mètre, la saturation des résidus Doyon n'est pas assurée sur toute la période d'observation. L'épaisseur du recouvrement doit être augmentée jusqu'à 2.1 m pour assurer en tout temps la saturation des résidus Doyon et donc l'efficacité de la méthode de restauration afin de limiter l'oxydation des résidus sur le long terme, selon les conditions définies du modèle numérique. Une seconde simulation a ensuite été réalisée afin de tester l'impact des propriétés hydrogéologiques ( $CRE$  et  $k_{sat}$ ) du matériel Westwood pour un recouvrement de 1 m. Ces propriétés ont été ajustées, en diminuant la porosité et la conductivité hydraulique saturée par rapport aux résultats de laboratoire. En appliquant ces paramètres ajustés, les résidus Doyon

demeurent saturés pendant la période d'observation. L'application à ce modèle numérique des trois scénarios climatiques n'a, comme précédemment, pas montré d'impact sur le niveau de la nappe phréatique et la saturation des résidus. Dans les trois cas, la saturation des résidus Doyon demeure optimale ( $S_r > 85\%$ ) et présente des valeurs similaires.

Une étude paramétrique a pour finir démontré l'influence du niveau initiale de la nappe phréatique ( $\frac{1}{2}$ PEA ou 1 PEA) sur l'évolution du niveau phréatique dans le cas des années présentant l'été le plus sec et le plus pluvieux pour le scénario climatique le plus pessimiste (IPSL-CM5A-MR). Dans le cas de l'année la plus sèche, un niveau phréatique à 1 PEA pourrait entraîner pendant une partie de l'été une désaturation du sommet des résidus Doyon. L'étude de l'influence de paramètres propres à la modélisation numérique, c'est-à-dire la prise en compte de la neige au sol (fonction « Données de neige ») et la valeur de l'albédo, n'a démontré que peu ou pas d'impact sur la simulation de l'élévation de la nappe phréatique et donc sur le comportement de la méthode de restauration.

## 7.2 Recommandations

Ces travaux de recherche ont permis de vérifier l'évolution du comportement hydrogéologique de la méthode de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche en prenant en compte la problématique des changements climatiques dans le cas du site minier Doyon-Westwood. Selon ces résultats, en employant des critères de design robustes (en particulier le niveau de la nappe phréatique et l'épaisseur du recouvrement) la performance de la méthode de restauration pourra être assurée sur le long terme jusqu'à l'horizon 2100. Afin de valider les résultats obtenus lors de ces travaux de recherche, d'autres aspects doivent être étudiés lors de travaux futurs.

L'utilisation de valeurs d'un niveau de la nappe phréatique défini à  $\frac{1}{2}$  AEV et 1 AEV dans le cadre de ces travaux a permis d'étudier le comportement de la méthode de restauration dans des conditions théoriques et potentiellement défavorables. Si des conditions plus favorables prévalent (c'est-à-dire niveau de la nappe à l'interface par exemple), il demeure important de poursuivre des investigations afin d'étudier l'impact des autres paramètres clés influant sur la performance de la méthode de restauration (propriétés des matériaux et épaisseur du recouvrement) et de prendre en compte en particulier les événements de sécheresses.

Les propriétés hydrogéologiques des matériaux (recouvrement et résidus) ont une importance capitale sur le bon fonctionnement de la méthode. Il est donc important de prendre en compte l'hétérogénéité des matériaux des résidus Doyon (dû au mode de déposition) par la réalisation de campagnes d'échantillonnage permettant de caractériser plusieurs secteurs représentatifs du parc ainsi que celle des résidus Westwood à différents moments de production.

Par la modélisation numérique, les critères de design doivent être appliqués selon les différentes propriétés rencontrées afin de les adapter. Dans la même optique, des améliorations peuvent également être apportées au modèle numérique en passant à un modèle 2D ou 3D afin de prendre en compte l'hétérogénéité latérale et en profondeur des résidus dans le parc mais également la variation possible du niveau de la nappe phréatique. Un suivi de l'évolution de l'infiltration et de l'évaporation en parallèle de celle de la nappe phréatique ainsi que les flux d'oxygène dans le recouvrement permettrait de prendre en compte l'impact de ces paramètres dans l'analyse de la performance de la méthode de restauration.

Les scénarios climatiques utilisés ne présentent pas de périodes de sécheresses problématiques pour la méthode de restauration. Cependant, à cause de l'incertitude entourant les résultats des simulations numériques (en particulier la variabilité naturelle du climat), il n'est pas à exclure que de telles périodes de sécheresses puissent survenir et mettre en péril la performance de la méthode de restauration. Une nouvelle approche afin de déterminer des conditions de sécheresses représentatives des conditions réelles (nombre de jours avec précipitations inférieures à 1 mm et cumul des précipitations avant la sécheresse) est en cours de réalisation (Bresson, Demers, Roy et Pabst, 2018) et pourrait être appliqué sur ce cas et permettra de valider la résilience de la méthode de restauration face à ces épisodes possibles de sécheresses.

Selon les standards de l'industrie minière, la remise dans un état satisfaisant d'infrastructure tel qu'un parc à résidus passe par une phase finale de remise en végétation. Il est possible à l'aide de la modélisation numérique de vérifier les effets de la végétation sur la performance de la méthode de restauration. SEEP/W possède par exemple une fonction permettant de prendre en compte différents facteurs clés. La végétation pouvant avoir un impact direct sur la quantité d'eau disponible en influant l'infiltration et l'évapotranspiration, il sera important de prendre en compte ce facteur sur la performance à long terme de la méthode de restauration.

La prise en compte de ces différents paramètres ainsi que l'approche consistant à prendre en compte des scénarios climatiques devraient être appliquée sur d'autres méthodes de restauration, sites miniers mais également d'autres infrastructures sensibles comme les haldes à stériles. Il sera alors possible de mettre en place une méthode d'analyse complète et robuste permettant à l'industrie minière de prendre en compte l'impact des changements climatiques sur le design de futures structures de confinement de rejets miniers et des méthodes de restauration qui seront utilisées.

## RÉFÉRENCES

- Aachib, M., Mbonimpa, M. et Aubertin, M. (2004). Measurement and prediction of the oxygen diffusion coefficient in unsaturated media, with applications to soil covers. *Water, Air, and Soil Pollution*, 156(1), 163-193.
- Ahmad, F. (2018). *Effect Of Climate Change on a Monolithic Desulphurized Tailings Cover*. (Université de York, Toronto, Ontario).
- Albright, W. H., Benson, C. H., Gee, G. W., Abichou, T., McDonald, E. V., Tyler, S. W. et Rock, S. A. (2006). Field performance of a compacted clay landfill final cover at a humid site. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11), 1393-1403.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. et Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome*, 300(9), D05109.
- Amos, R. T., Blowes, D. W., Bailey, B. L., Sego, D. C., Smith, L. et Ritchie, A. I. M. (2015). Waste-rock hydrogeology and geochemistry. *Applied Geochemistry*, 57, 140-156. doi: 10.1016/j.apgeochem.2014.06.020
- Arya, L. M., Leij, F. J., van Genuchten, M. T. et Shouse, P. J. (1999). Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data. *Soil Science Society of America Journal*, 63(3), 510-519.
- Arya, L. M. et Paris, J. F. (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data 1. *Soil Science Society of America Journal*, 45(6), 1023-1030.
- ASTM D5550-14. (2014). Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer. Dans ASTM International (dir.). West Conshohocken, PA.
- ASTM D5856-15. (2015). Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter. Dans ASTM International (dir.). West Conshohocken, PA.

- Aubertin, M., Bussière, B., Aachib, M., Chapuis, R. et Crespo, J. (1996). Une modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couvertures multicouches en sols. *Hydrogéologie, 1*, 3-13.
- Aubertin, M., Bussière, B. et Bernier, L. (2002). *Environnement et gestion des rejets miniers*
- Aubertin, M., Bussière, B., James, M., Jaouhar, E., Martin, V., Pépin, N., . . . Chapuis, R. (2011). *Vers une mise à jour des critères de stabilité géotechnique pour la conception des ouvrages de retenue de résidus miniers*. Communication présentée Symposium on mines and the environment, Rouyn-Noranda, QC.
- Aubertin, M., Bussière, B., Monzon, M., Joanes, A., Gagnon, D., Barbera, J., . . . Bernier, L. (1999) Étude sur les barrières sèches construites à partir de résidus miniers Phase II: Essais en place. *Vol. 1899. Water, Air, and Soil Pollution: NEDEM*.
- Aubertin, M., Chapuis, R., Aachib, M., Bussière, B., Ricard, J.-F. et Tremblay, L. (1995) Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers. MEND - École Polytechnique de Montréal.
- Aubertin, M., Chapuis, R., Aachib, M., Ricard, J., Tremblay, L. et Bussière, B. (1994). *Cover technology for acidic tailings: Hydrogeological properties of milling wastes used as capillary barrier*. Communication présentée Proceedings of the 1st International Congress on Environmental Geotechnic, Edmonton, Alta.
- Aubertin, M., Dionne, J. et Marcoux, L. (1997, May 31–June 6). *Design guidelines and stability criteria of engineering works for water covers*. Communication présentée 4th ICARD, Vancouver, BC.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B. et Chapuis, R. (2003a). Development of a model to predict the water retention curve using basic geotechnical properties.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B. et Chapuis, R. (2003b). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal, 40*(6), 1104-1122. doi: 10.1139/t03-054
- Aubertin, M., Molson, J., Bussière, B. et Dagenais, A.-M. (2006). *Investigations of layered cover systems acting as oxygen barriers to limit acid mine drainage*. Communication présentée Proc. 5th Int. Conf. Environmental Geotechnics.

- Aubertin, M., Ricard, J.-F. et Chapuis, R. P. (1998). A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(1), 55-69.
- Awoh, A. S. (2012). *Étude expérimentale du comportement géochimique de résidus miniers hautement sulfureux sous un recouvrement en eau*. (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue).
- Awoh, A. S., Mbonimpa, M. et Bussière, B. (2013a). Determination of the reaction rate coefficient of sulphide mine tailings deposited under water. *Journal of environmental management*, 128, 1023-1032.
- Awoh, A. S., Mbonimpa, M. et Bussière, B. (2013b). Field study of the chemical and physical stability of highly sulphide-rich tailings stored under a shallow water cover. *Mine Water and the Environment*, 32(1), 42-55.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. New York: Dover Publications Inc.
- Bennet, J., Harries, J. et Ritchie, A. (1989, August 13-18, 1989). *Limitations on pyrite oxidation rates set by air transport mechanisms*. Communication présentée Biohydrometallurgy International Symposium, Jackson Hole, Australia.
- Benson, C., Bohnhoff, G., Ogorzalek, A., Shackelford, C., Apiwantragoon, P. et Albright, W. (2005). *Field data and model predictions for a monolithic alternative cover*. Communication présentée Geo-Frontier.
- Benson, C. H., Sawangsuriya, A., Trzebiatowski, B. et Albright, W. (2007). Postconstruction changes in the hydraulic properties of water balance cover soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(4), 349-359.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Demers, I., Aubertin, M., Fried, É. et Blier, A. (2008). Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada. *Minerals Engineering*, 21(4), 330-340.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Kongolo, M., McLaughlin, J. et Marion, P. (2000). Environmental desulphurization of four Canadian mine tailings using froth flotation. *International journal of mineral processing*, 60(1), 57-74.



- Berg, P., Feldmann, H. et Panitz, H.-J. (2012). Bias correction of high resolution regional climate model data. *Journal of Hydrology*, 448, 80-92.
- Blight, G. (2002). Measuring evaporation from soil surfaces for environmental and geotechnical purposes. *Water SA*, 28(4), 381-394.
- Blowes, D., Ptacek, C., Jambor, J. et Weisener, C. (2003). The geochemistry of acid mine drainage. *Treatise on geochemistry*, 9, 612.
- Boon, M. et Heijnen, J. J. (2001). Solid-liquid mass transfer limitation of ferrous iron in the chemical oxidation of FeS<sub>2</sub> at high redox potential. *Hydrometallurgy*, 62(1), 57-66.
- Bossé, B., Bussière, B., Hakkou, R., Maqsoud, A. et Benzaazoua, M. (2015). Field experimental cells to assess hydrogeological behaviour of store-and-release covers made with phosphate mine waste. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(9), 1255-1269.
- Bossé, B., Bussière, B., Maqsoud, A., Hakkou, R. et Benzaazoua, M. (2016). Hydrogeological Behavior of a Store-and-Release Cover: A Comparison Between Field Column Tests and Numerical Predictions With or Without Hysteresis Effects. *Mine Water and the Environment*, 35(2), 221-234. doi: 10.1007/s10230-015-0350-8
- Bresson, É. (2019; à paraître). Projection et indices climatiques pour les sites de Lorraine, Doyon-Westwood et Canadian Malartic: Research Institute on Mines and the Environment (RIME).
- Bresson, É., Demers, I., Roy, P. et Pabst, T. (2018). *Efficiency of reclamation methods under climate change: definition of a drought index*. Communication présentée 18th International Conference on Tailings and Mine Waste, Keystone, CO, USA.
- Brooks, R. et Corey, A. (1964). Hydraulic properties of porous media *Hydrology Paper No. 3*. Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Burdine, N. (1953). Relative permeability calculations from pore size distribution data. *Trans. AIME*, 198, 71-77.
- Bussière, B. (2007). Hydro-geotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geo-environmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(9), 1019-1052.

- Bussière, B., Aubertin, M. et Chapuis, R. P. (2003). The behavior of inclined covers used as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3), 512-535.
- Bussière, B., Aubertin, M. et Julien, M. (2001). Couvertures avec effets de barrière capillaire pour limiter le drainage minier acide: aspects théoriques et pratiques. *Vecteur environnement*, 34(3), 37-50.
- Bussière, B., Aubertin, M., Mbonimpa, M., Molson, J. W. et Chapuis, R. P. (2007). Field experimental cells to evaluate the hydrogeological behaviour of oxygen barriers made of silty materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(3), 245-265.
- Bussière, B., Benzaazoua, M., Aubertin, M. et Mbonimpa, M. (2004). A laboratory study of covers made of low-sulphide tailings to prevent acid mine drainage. *Environmental Geology*, 45(5), 609-622.
- Bussière, B., Lelièvre, J., Ouellet, J. et Bois, D. (1995). *Utilisation de résidus miniers désulfurés comme recouvrement pour prévenir le DMA: analyse technico-économique sur deux cas réels*. Communication présentée Sudbury'95, Conference on Mining and the Environment, Sudbury, ON.
- Bussière, B., Maqsoud, A., Aubertin, M., Martschuk, J., McMullen, J. et Julien, M. (2006). Performance of the oxygen limiting cover at the LTA site, Malartic, Quebec. *CIM Bulletin*, 1(6), 1-11.
- Bussière, B., Maqsoud, A., Demers, I., Aubertin, M. et Chapuis, R. (2012). Modélisation physique de divers scénarios de recouvrement et étude du comportement hydrogéologique : site Manitou. Addendum au rapport final PU-2008-03-371 (p. 19). Rouyn-Noranda, QC: Unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM), Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT).
- Bussière, B., Maqsoud, A., Demers, I., Doumbouya, I., Aubertin, M. et Chapuis, R. (2009). Modélisation physique de divers scénarios de recouvrement et étude du comportement hydrogéologique : site Manitou. Rapport d'avancement No 2 PU-2008-03-371 (p. 38). Rouyn-Noranda, QC: Unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM), Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT).

- Bussière, B., Maqsoud, A., Demers, I., Éthier, M., Aubertin, M. et Chapuis, R. (2008). Modélisation physique de divers scénarios de recouvrement et étude du comportement hydrogéologique : site Manitou. Rapport intermédiaire PU-2008-03-371 (p. 15). Rouyn-Noranda, QC: Unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM), Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT).
- Bussière, B., Maqsoud, A., Demers, I., Rousselle, M., Aubertin, M. et Chapuis, R. (2011). Modélisation physique de divers scénarios de recouvrement et étude du comportement hydrogéologique : site Manitou. Rapport final PU-2008-03-371 (p. 81). Rouyn-Noranda: Unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM), Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT).
- Campbell, G. (1974). A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.*, 117, 311–314.
- Carman, P. (1956). *Flow of Gas Through Porous Media*. New York: Academic Press Inc.
- Chapuis, R. et Aubertin, M. (2003). On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3), 616-628.
- Chapuis, R., Chenaf, D., Bussière, B., Aubertin, M. et Crespo, R. (2001). A user's approach to assess numerical codes for saturated and unsaturated seepage conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 1113-1126.
- Chapuis, R., Crespo, R., Chenaf, D. et Aubertin, M. (1993). *Evaluation of a groundwater FEM software for steady and unsteady state conditions*. Communication présentée 46th Canadian Geotechnical Conference, Saskatoon, SK, Canada.
- Charron, I. (2016). Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation, Édition 2016 (p. 94): Ouranos.
- Childs, E. et Collis-George, G. (1950). *The permeability of porous materials*. Communication présentée Royal Society of London, Series A.
- Choo, L.-P. et Yanful, E. K. (2000). Water flow through cover soils using modeling and experimental methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4), 324-334.

- Christensen, D., Barbour, S., O’Kane, M. et Meiers, G. (2002). *Long-term performance of dry cover systems for reactive mine waste*. Communication présentée 1st Symposium sur l’Environnement et les Mines (2005), Rouyn Noranda, QC, Canada.
- Cissokho, F. (2008). *Études numériques des effets de la configuration des couvertures à effets de barrières capillaires inclinées sur la diffusion de l’oxygène*. (École Polytechnique de Montréal-UQAT, ProQuest Dissertations Publishing).
- Collin, M. et Rasmuson, A. (1988). A comparison of gas diffusivity models for unsaturated porous media. *Soil Science Society of America Journal*, 52(6), 1559-1565.
- Cosset, G. (2009). *Comportement hydrogéologique d’une couverture monocouche sur des résidus miniers sulfureux: Essais en colonne et simulations numériques*. (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue).
- Cosset, G. et Aubertin, M. (2010). *Physical and numerical modelling of a monolayer cover placed on reactive tailings*. Communication présentée Proceedings of the 63rd Canadian Geotechnical Conference & 1st Joint CGS/CNC-IPA Permafrost Specialty Conference, Calgary.
- Crank, J. (1979). *The mathematics of diffusion*. Oxford university press.
- Crespo, J. (1995). *Modelisation des écoulements a travers les ouvrages de retenue et de confinement des residus miniers par un logiciel d’elements finis*. (Ecole Polytechnique de Montreal).
- Cui, Y.-J. et Zornberg, J. G. (2008). Water balance and evapotranspiration monitoring in geotechnical and geoenvironmental engineering (*Laboratory and Field Testing of Unsaturated Soils* (p. 171-186): Springer.
- Dagenais, A.-M. (2005). *Techniques de contrôle du drainage minier acide basées sur les effets capillaires*. (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue).
- Dagenais, A.-M., Aubertin, M. et Bussière, B. (2006). *Parametric study on the water content profiles and oxidation rates in nearly saturated tailings above the water table*. Communication présentée Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD).

- Dagenais, A.-M., Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L. et Cyr, J. (2001). *Monitoring at the Lorraine mine site: a follow up on the remediation plan*. Communication présentée 2001 National Association of Abandoned Mine Land Programs Annual Conference: Land Reborn: Tolls for the 21st Century, Athens, Ohio. Proceedings on CD-Rom.
- Dagenais, A.-M., Aubertin, M., Bussière, B., Cyr, J. et Fontaine, R. (2002). *Auscultation et suivi du recouvrement multicouche construit au site minier Lorraine, Latulipe, Québec*. Communication présentée Défis & Perspectives: Symposium sur l'Environnement et les Mines, Rouyn-Noranda.
- Dagenais, A.-M., Mbonimpa, M., Bussière, B. et Aubertin, M. (2011). A modified oxygen consumption test to evaluate gas flux through oxygen barrier cover systems. *Geotechnical testing journal*, 35(1), 150-158.
- Day, S., Higgs, T. et Paine, M. (1996). Guide for Predicting Water Chemistry from Waste Rock Piles. *Canadian MEND Report, 1*.
- Delage, P. et Cui, Y. J. (2000). *L'eau dans les sols non saturés*.
- Delleur, J. W. (2010). *The handbook of groundwater engineering*. CRC press.
- Demers, I. (2008). *Performance d'une barrière à l'oxygène constituée de résidus miniers faiblement sulfureux pour contrôler la production de drainage minier acide*. (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue). (eprint\_uqat\_meta116)
- Demers, I., Bussière, B., Benzaazoua, M., Mbonimpa, M. et Blier, A. (2008a). Column test investigation on the performance of monolayer covers made of desulphurized tailings to prevent acid mine drainage. *Minerals Engineering*, 21(4), 317-329.
- Demers, I., Bussière, B., Benzaazoua, M., Mbonimpa, M. et Blier, A. (2008b). *Optimisation of single-layer cover made of desulphurized tailings: application to the Doyon mine tailings impoundment*. Communication présentée Proceedings of the SME annual meeting, Salt Lake City, Utah.
- Demers, I., Bussière, B., Mbonimpa, M. et Benzaazoua, M. (2009). Oxygen diffusion and consumption in low-sulphide tailings covers. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(4), 454.

- Demers, I., Bussière, B., Rousselle, M., Aubertin, M., Pabst, T. et Lacroix, R. (2013). *Laboratory evaluation of reclamation scenarios for the spillage areas of the abandoned Manitou mine site using Goldex tailings*. Communication présentée 23rd World Mining Congress, Montreal, QC.
- Desjarlais, C. et Blondlot, A. (2010). Savoir s'adapter aux changements climatiques (p. 137): Ouranos.
- Dobchuk, B., Nichol, C., Wilson, G. W. et Aubertin, M. (2013). Evaluation of a single-layer desulphurized tailings cover. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(7), 777-792.
- Dobchuk, B. S. (2002). *Evaluation of the effectiveness of a desulphurized tailings cover at Detour Lake Mine*. (University of Saskatchewan, Saskatoon).
- Drobinski, P. (2016). Modèles globaux ou régionaux: comment zoomer le climat? *Accromath*, 11, 14-17.
- Elberling, B. (2001). Environmental controls of the seasonal variation in oxygen uptake in sulfidic tailings deposited in a permafrost- affected area. *Water Resources Research*, 37(1), 99-107.
- Elberling, B., Nicholson, R. et David, D. (1993). Field evaluation of sulphide oxidation rates. *Hydrology Research*, 24(5), 323-338.
- Ethier, M. (2018). *Évaluation de la performance d'un système de recouvrement monocouche avec nappe surélevée pour la restauration d'un parc à résidus miniers abandonné*. (Ph.D., UQAT). Repéré à <http://depositum.uqat.ca/762/1/Ethier.pdf> (eprint\_uqat\_meta762)
- Ethier, M., Bussière, B., Aubertin, M., Demers, I., Maqsoud, A., Dionne, J. et Roy, M. (2014). *Results from a field investigation of the elevated water table technique combined with a monolayer cover on reactive tailings*. Communication présentée 67th Canadian Geotechnical Conference, Regina (Saskatchewan), Canada.
- Ethier, M., Bussière, B., Aubertin, M., Maqsoud, A., Demers, I. et Broda, S. (2018). In situ evaluation of performance of reclamation measures implemented on abandoned reactive tailings disposal site. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(12), 1742-1755. doi: 10.1139/cgj-2016-0699

- Ethier, M., Bussière, B., Aubertin, M., Maqsoud, A., Demers, I. et Lacroix, R. (2013). *In situ evaluation of the elevated water table technique combined with a monolayer cover on reactive tailings: monitoring strategy and preliminary results*. Communication présentée 66th Canadian Geotechnical Conference & 11th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, Montréal (Québec), Canada.
- Ethier, M., Bussière, B., Broda, S. et Aubertin, M. (2018). Three-dimensional hydrogeological modeling to assess the elevated-water-table technique for controlling acid generation from an abandoned tailings site in Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*, 1-19. doi: 10.1007/s10040-017-1713-y
- Evangelou, V. et Zhang, Y. (1995). A review: pyrite oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 25(2), 141-199.
- Ford, J. D., Pearce, T., Prno, J., Duerden, F., Berrang Ford, L., Beaumier, M. et Smith, T. (2009). Perceptions of climate change risks in primary resource use industries: a survey of the Canadian mining sector. *Regional Environmental Change*, 10(1), 65-81. doi: 10.1007/s10113-009-0094-8
- Ford, J. D., Pearce, T., Prno, J., Duerden, F., Berrang Ford, L., Smith, T. R. et Beaumier, M. (2011). Canary in a coal mine: perceptions of climate change risks and response options among Canadian mine operations. *Climatic change*, 109(3-4), 399-415. doi: 10.1007/s10584-011-0029-5
- Fredlund, D., Rahardjo, H. et Fredlund, M. (2012). *Unsaturated soil mechanics in engineering practice*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Fredlund, D., Rahardjo, H. et Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
- Fredlund, D. et Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3), 521-532. doi: 10.1016/0148-9062(95)96992-K
- Fredlund, D., Xing, A. et Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 533-546. doi: 10.1016/0148-9062(95)96995-N
- Freeze, R. et Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.

- Gardner, W. (1958). Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.*, 85, 228–232.
- Geo-Slope International Ltd. (2017) Heat and mass transfer modeling with GeoStudio 2018.
- Gosselin, M., Mbonimpa, M., Aubertin, M. et Martin, V. (2007). An investigation of the effect of the degree of saturation on the oxygen reaction rate coefficient of sulphidic tailings. *Proceedings of the ERTEP*.
- Gudmundsson, L., Bremnes, J., Haugen, J. et Engen-Skaugen, T. (2012). Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations—a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3383–3390.
- Haverkamp, R., Debionne, S., Angulo-Jaramillo, R. et de Condappa, D. (2016). Soil properties and moisture movement in the unsaturated zone (*The Handbook of Groundwater Engineering, Third Edition* (p. 167-208): CRC Press.
- Haverkamp, R. et Parlange, J.-Y. (1986). Predicting the water-retention curve from particle-size distribution: 1. Sandy soils without organic matter1. *Soil Science*, 142(6), 325–339.
- Hazen, A. (1911). Discussion of dams on sand foundations. *Transactions, American Society of Civil Engineers*, 73, 199–203.
- Hillel, D. (2004). *Introduction to environmental soil physics*. Amsterdam, Boston: Elsevier Academic Press.
- Jambor, J. et Blowes, D. (1998). Theory and applications of mineralogy in environmental studies of sulfide-bearing mine wastes. *Modern approaches to ore and environmental mineralogy*, 27, 367–401.
- Kachhwal, L. K., Yanful, E. K. et Lanteigne, L. (2011). Water cover technology for reactive tailings management: a case study of field measurement and model predictions. *Water, Air, & Soil Pollution*, 214(1-4), 357–382.
- Kim, H. et Benson, C. H. (2004). Contributions of advective and diffusive oxygen transport through multilayer composite caps over mine waste. *Journal of Contaminant Hydrology*, 71(1), 193–218. doi: 10.1016/j.jconhyd.2003.10.001



- Knidiri, J., Bussière, B., Hakkou, R., Bossé, B., Maqsoud, A. et Benzaazoua, M. (2016). Hydrogeological behaviour of an inclined store-and-release cover experimental cell made with phosphate mine wastes. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(1), 102-116.
- Kovács, G. (1981). *Seepage hydraulics*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Kozeny, J. (1953). *Hydraulics*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publication.
- Kwong, Y. (1993). Prediction and prevention of acid rock drainage from a geological and mineralogical perspective (Vol. Report 1.32.1, p. 47). Ottawa: MEND.
- Lefèbvre, R. (1994). *Caractérisation et modélisation numérique du drainage minier acide dans les haldes à stériles*. (Université Laval, Québec).
- Mahrt, L. et Ek, M. (1984). The influence of atmospheric stability on potential evaporation. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2), 222-234.
- Makkink, G. (1957). Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers*, 11, 277-288.
- Malvern Panalytical Ltd. (2019). Mastersizer 3000. Repéré le 2019-02-24 à <https://www.malvernpanalytical.com/fr/products/product-range/mastersizer-range/mastersizer-3000/index.html>
- Maqsoud, A., Bussière, B., Aubertin, M. et Mbonimpa, M. (2006). Modification of the predictive MK model to integrate hysteresis of the water retention curve (*Unsaturated Soils 2006* (p. 2465-2476).
- Maqsoud, A., Bussière, B., Aubertin, M. et Mbonimpa, M. (2012). Predicting Hysteresis of the Water Retention Curve from Basic Properties of Granular Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(5), 1147-1159. doi: 10.1007/s10706-012-9529-y
- Mbonimpa, M. et Aubertin, M. (2002). Mouvement des gaz en milieu poreux partiellement saturés (Vol. Rapport EPM-RT-03-04): Ecole Polytechnique de Montréal.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Aachib, M. et Bussière, B. (2003). Diffusion and consumption of oxygen in unsaturated cover materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(5), 916-932.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M. et Bussière, B. (2006). Predicting the unsaturated hydraulic conductivity of granular soils from basic geotechnical properties using the modified Kovács

- (MK) model and statistical models. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(8), 773-787. doi: 10.2989/JMAA.2009.6.1.9.1061
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Chapuis, R. et Bussière, B. (2002). Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotechnical & Geological Engineering*, 20(3), 235-259. doi: 10.1023/A:1016046214724
- McIntosh, J. et Groat, L. (1997). *Biological-mineralogical interactions*. Mineralogical association of Canada.
- MEND. (2001). Prevention and control MEND 5.4.2d (Vol. 4). Ottawa, ON: MEND.
- MERN (2017). *Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec*. Québec, Canada.
- Monette, A. (2012). *L'étude des changements appréhendés des précipitations extrêmes sur la province du Québec en utilisant un ensemble de multi-MRC*. (UQAM). Repéré à <http://www.archipel.uqam.ca/5090/1/M12583.pdf> (eprint\_UQAM5090)
- Morin, K., Gerencher, E., Jones, C. et Konasewich, D. (1991). Critical literature review of acid drainage from waste rock (Vol. Project 1.11.1.): MEND.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., . . . Kram, T. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12, 513-522.
- Myhre, G., Highwood, E. J., Shine, K. P. et Stordal, F. (1998). New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases. *Geophysical research letters*, 25(14), 2715-2718.
- Nicholson, R. V. (1994). *Iron-sulfide oxidation mechanisms: laboratory studies*. Communication présentée Environmental Geochemistry of Sulphide Mine-Wastes, Waterloo.
- Nicholson, R. V., Gillham, R. W., Cherry, J. A. et Reardon, E. J. (1989). Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(1), 1-8.

- Nordstrom, D. K. et Southam, G. (1997). Geomicrobiology of sulfide mineral oxidation. *Reviews in mineralogy*, 35, 361-390.
- Orava, D., Tremblay, G., Tibble, A. et Nicholson, R. (1997). *Prevention of acid rock drainage through the application of in-pit disposal and elevated water table concepts*. Communication présentée Proceedings of the 4th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Vancouver, BC.
- Ouangrawa, M. (2007). *Étude expérimentale et analyse numérique des facteurs qui influencent le comportement hydro-géochimique de résidus miniers sulfureux partiellement saturés*. (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue).
- Ouangrawa, M., Aubertin, M., Molson, J., Bussière, B. et Zagury, G. (2010). Preventing Acid Mine Drainage with an Elevated Water Table: Long-Term Column Experiments and Parameter Analysis. *Water, Air, & Soil Pollution*, 213(1-4), 437-458. doi: 10.1007/s11270-010-0397-x
- Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Bussière, B. et Zagury, G. (2009). Reactive transport modelling of mine tailings columns with capillarity-induced high water saturation for preventing sulfide oxidation. *Applied Geochemistry*, 24(7), 1312-1323. doi: 10.1016/j.apgeochem.2009.04.005
- Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Zagury, G. et Bussière, B. (2006). *The effect of water table elevation on acid mine drainage from reactive tailings: a laboratory and numerical modeling study*. Communication présentée 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), St. Louis, Mo.
- Pabst, T. (2011). *Étude expérimentale et numérique du comportement hydro-géochimique de recouvrements placés sur des résidus sulfureux partiellement oxydés*. (Ecole Polytechnique de Montréal).
- Pabst, T., Aubertin, M., Bussière, B. et Molson, J. (2010). *Analysis of monolayer covers for the reclamation of acid generating tailings-Column tests and interpretation*. Communication présentée Proceedings: 63rd Canadian Geotechnical Conference & 1st Joint CGS/CNC-IPA Permafrost Specialty Conference, Calgary.

- Pabst, T., Aubertin, M., Bussière, B. et Molson, J. (2011, September 18-21, 2011). *Column tests to assess water flow and oxygen transport in monolayer covers for the reclamation of acid-generating tailings*. Communication présentée Mine Closure Conference, Lake Louise, AB.
- Pabst, T., Aubertin, M., Bussière, B. et Molson, J. (2014). Column tests to characterise the hydrogeochemical response of pre-oxidised acid-generating tailings with a monolayer cover. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(2), 1841.
- Pabst, T., Aubertin, M., Bussière, B. et Molson, J. (2017). Experimental and numerical evaluation of single-layer covers placed on acid-generating tailings. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(4), 1421-1438. doi: 10.1007/s10706-017-0185-0
- Pabst, T., Molson, J., Aubertin, M. et Bussière, B. (2011, September 18-21, 2011). *Physical and geochemical transport modelling of pre-oxidized acid-generating tailings with a monolayer cover*. Communication présentée Mine Closure Conference, Lake Louise, AB.
- Pabst, T., Molson, J., Aubertin, M. et Bussière, B. (2017). Reactive transport modelling of the hydro-geochemical behaviour of partially oxidized acid-generating mine tailings with a monolayer cover. *Applied Geochemistry*, 78, 219-233. doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.01.003
- Pearce, T., Ford, J., Duerden, F. et Marshall, D. (2010). Climate change and Canadian mining: opportunities for adaptation. *Risk Management*.
- Pearce, T. D., Ford, J. D., Prno, J., Duerden, F., Pittman, J., Beaumier, M., . . . Smit, B. (2011). Climate change and mining in Canada. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 16(3), 347-368.
- Penman, H. (1940). Gas and vapour movements in the soil: II. The diffusion of carbon dioxide through porous solids. *The Journal of Agricultural Science*, 30(4), 570-581.
- Perkins, E., Nesbitt, H., Gunter, W., St-Arnaud, L. et Mycroft, J. (1995). Critical review of geochemical processes and geochemical models adaptable for prediction of acidic drainage from waste rock (Vol. 1.42.1). Ottawa: MEND.
- Piani, C., Weedon, G., Best, M., Gomes, S., Viterbo, P., Hagemann, S. et Haerter, J. (2010). Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 395(3), 199-215.

- Pittman, J., Pearce, T. et Ford, J. (2013). Adaptation To Climate Change And Potash Mining In Saskatchewan: Case study From The Qu'Appelle River Watershed (p. 19). Ottawa, ON: Climate Change Impacts and Adaptation Division, Natural Resources Canada.
- Plumlee, G. S. (1999). The environmental geology of mineral deposits. *The environmental geochemistry of mineral deposits. Society of Economic Geologists. Part A*, 71-116.
- Plummer, D., Caya, D., Frigon, A. et Côté, H. (2006). Climate and Climate Change over North America as Simulated by the Canadian RCM. *Journal of Climate*, 19(13), 3112-3132.
- Poulsen, T., Moldrup, P. et Jacobsen, O. (1998). One-parameter model for unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci.*, 163, 425-435.
- Priestley, C. H. B. et Taylor, R. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review*, 100(2), 81-92.
- Renault, P. et Stengel, P. (1994). Modeling oxygen diffusion in aggregated soils: I. Anaerobiosis inside the aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, 58(4), 1017-1023.
- Rey, N. J., Demers, I., Bussière, B., Mbonimpa, M. et Lortie, S. (2016). *Field experiments to test the elevated water table concept combined with a desulfurized tailings cover layer*. Communication présentée Geo-Chicago 2016, Chicago, USA.
- Rey, N. J., Demers, I., Bussière, B., Mbonimpa, M. et Lortie, S. (2017). *Laboratory and field study of oxygen flux and hydrogeological behaviour of monolayer covers made of low-sulfide tailings combined with an elevated water table placed over acid-generating mine tailings*. Communication présentée Geo-Ottawa 2017, Ottawa (Ontario), Canada.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., . . . Rafaj, P. (2011). RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic change*, 109(1-2), 33.
- Ricard, J.-F. (1995). *Étude en laboratoire de la relation capillaire et de la conductivité hydraulique de résidus miniers*.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318-333.

- Romano, C. G., Ulrich Mayer, K., Jones, D. R., Ellerbroek, D. A. et Blowes, D. W. (2003). Effectiveness of various cover scenarios on the rate of sulfide oxidation of mine tailings. *Journal of Hydrology*, 271(1-4), 171-187. doi: 10.1016/s0022-1694(02)00348-7
- Roy, P. (2015). Synthèse des changements climatiques pour le secteur minier (p. 55): Ouranos.
- Senes. (1996). Review of use of an elevated water table as a method to control and reduce acidic drainage from tailings (p. 165): MEND.
- Shackelford, C. D. et Benson, C. H. (2006). Selected factors affecting water-balance predictions for alternative covers using unsaturated flow models (*GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age* (p. 1-6).
- Sherlock, E., Lawrence, R. et Poulin, R. (1995). On the neutralization of acid rock drainage by carbonate and silicate minerals. *Environmental Geology*, 25(1), 43-54.
- Shine, K. P., Cook, J., Highwood, E. J. et Joshi, M. M. (2003). An alternative to radiative forcing for estimating the relative importance of climate change mechanisms. *Geophysical research letters*, 30(20).
- Singer, P. C. et Stumm, W. (1970). Acidic mine drainage: the rate-determining step. *Science*, 167(3921), 1121-1123.
- Sjoberg, B., Wilson, G. et Aubertin, M. (2001, September 16-19). *Field and laboratory characterization of a desulphurized tailings cover system*. Communication présentée 54th Canadian Geotechnical Conference, Calgary, AB.
- Snoeyink, V. L. et Jenkins, D. (1980). *Water chemistry*. John Wiley.
- Song, Q. et Yanful, E. (2008). Monitoring and modeling of sand-bentonite cover for ARD mitigation. *Water Air and Soil Pollution*, 190(1-4), 65-85.
- SRK. (1989). Draft acid rock drainage technical guide. Vancouver: Steffen, Robertson and Kirsten (BC) Inc.
- Stratos. (2011). Climate change and acid rock drainage - Risks for the Canadian mining sector (p. 56).
- Taylor, D. (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*. Wiley, New York.

- Taylor, K., Stouffer, R. et Meehl, G. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498.
- Teutschbein, C. et Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456, 12-29.
- Thomson, A. M., Calvin, K. V., Smith, S. J., Kyle, G. P., Volke, A., Patel, P., . . . Clarke, L. E. (2011). RCP4. 5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic change*, 109(1-2), 77.
- Tyler, S. W. et Wheatcraft, S. W. (1990). Fractal processes in soil water retention. *Water Resources Research*, 26(5), 1047-1054.
- URSTM. (2017). Analyse de risques et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois (p. 122): UQAT.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- Vigneault, B., Kwong, Y. et Warren, L. (2007). Assessing the long term performance of a shallow water cover to limit oxidation of reactive tailings at Louvicourt Mine (Vol. 2.12.2, p. 38): MEND.
- Villeneuve, C. et Richard, F. (2007). *Vivre les changements climatiques réagir pour l'avenir*. (Nouv. éd. rev. et augm.<sup>e</sup> éd.). Sainte-Foy, Québec: Éditions MultiMondes.
- Ward, N., Bucchignani, E., Montesarchio, M., Zollo, A., Rianna, G., Mancosu, N., . . . Todorovi, M. (2015). *Descendre l'échelle de la modélisation climatique pour des informations climatiques et une évaluation d'impact à haute résolution*.
- Wilson, G., Fredlund, D. et Barbour, S. (1994). Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(2), 151-161.
- Yanful, E. K. et Catalan, L. (2002). Predicted and field-measured resuspension of flooded mine tailings. *Journal of Environmental Engineering*, 128(4), 341-351.

## ANNEXE A RÉSULTATS DU SUIVI DES CELLULES DE TERRAIN 2018 - SITE DOYON-WESTWOOD

### A.1 Suivi hydrologique

#### A.1.1 Teneur en eau volumique

Les teneurs en eau volumique sont mesurées en continu tout au long de l'année à des profondeurs de 10 cm, 90 cm et 110 cm à partir de la surface de la cellule. Ces valeurs sont mesurées toutes les 6 heures. Elles sont représentées graphiquement à la figure A.1.

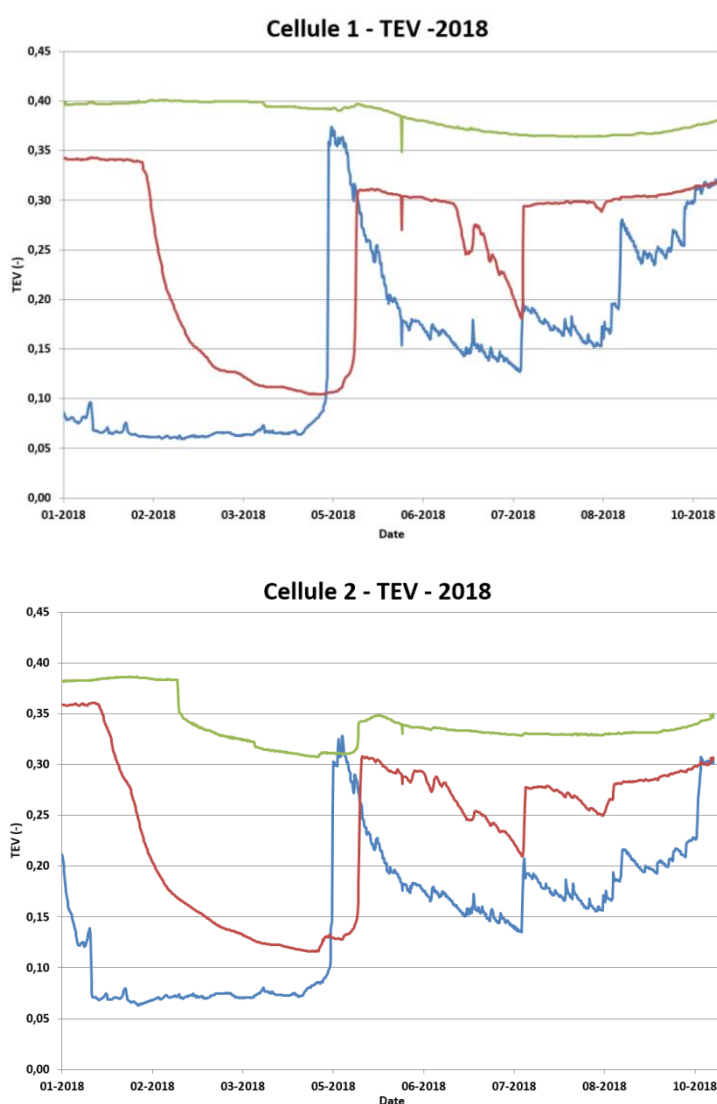


Figure A.1 : Suivi 2018 des teneurs en eau volumique au sein des cellules #1 et #2  
(vert : 110 cm, rouge : 90 cm, bleu : 10 cm)



La figure A.2 représente l'évolution de la teneur en eau volumique pour le suivi complet de 2015 à 2018.

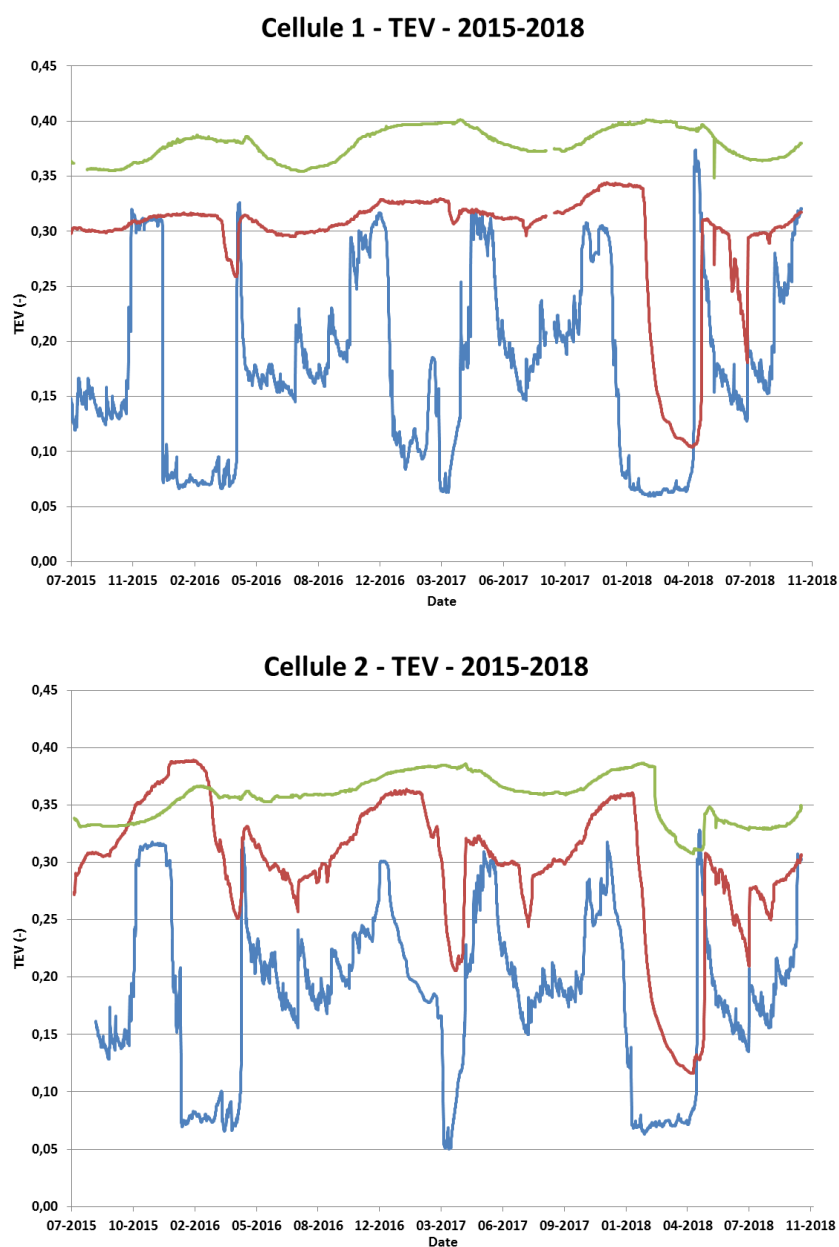


Figure A.2 : Suivi 2015-2018 des teneurs en eau volumique au sein des cellules #1 et #2  
(vert : 110 cm, rouge : 90 cm, bleu : 10 cm)

### A.1.2 Succion

Les succions ont également été mesurées en continu tout au long de l'année à des profondeurs de 10 cm et 90 cm à partir de la surface de la cellule. Ces valeurs sont mesurées toutes les 4 heures. Pour la cellule #2, l'enregistrement des données a pris fin le 5 octobre au lieu du 19 octobre, à cause d'un problème de batterie. Elles sont représentées graphiquement à la figure A.3. Pendant la période hivernale, les valeurs mesurées ne sont pas représentatives de la réalité, elles n'apparaissent donc pas sur les graphiques.

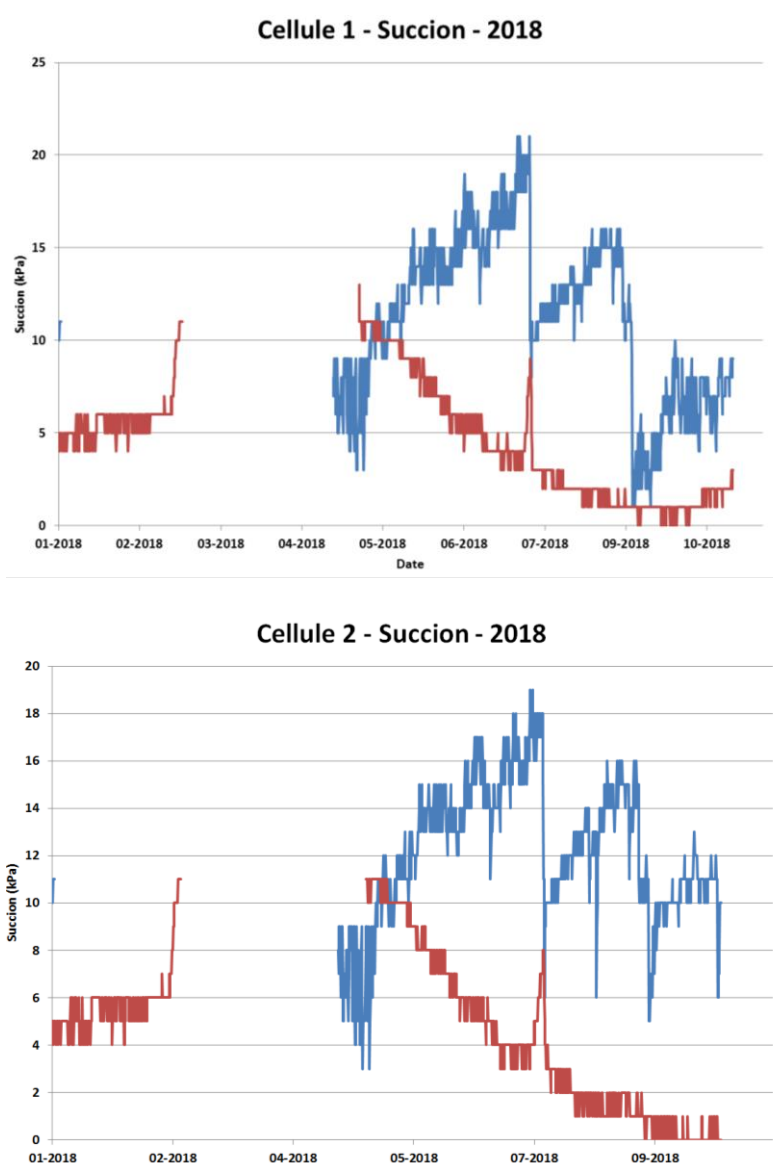


Figure A.3 : Suivi 2018 des succions au sein des cellules #1 et #2(rouge : 90 cm, bleu 10 cm)

La figure A.4 représente l'évolution de la succion pour le suivi complet de 2015 à 2018.

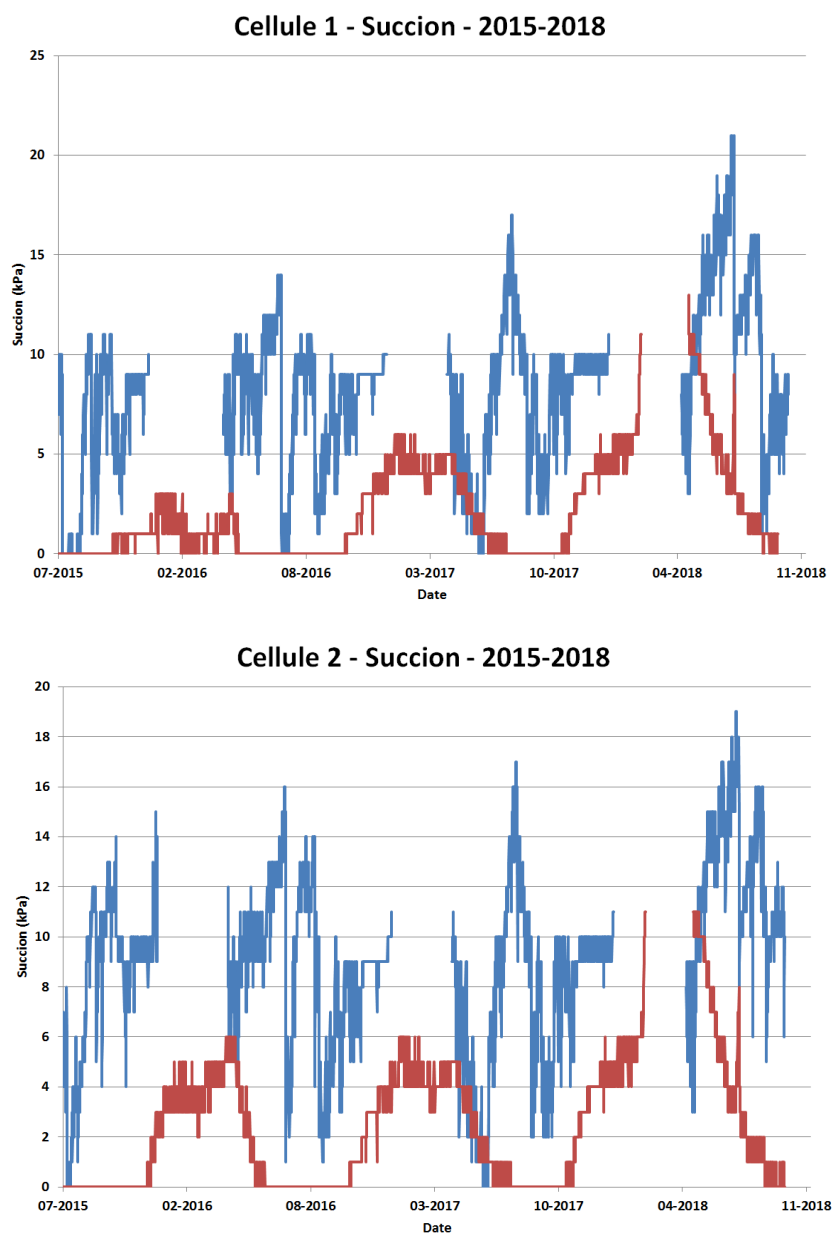


Figure A.4 : Suivi 2015-2018 des succions au sein des cellules #1 et #2  
(rouge : 90 cm, bleu 10 cm)

### A.1.3 Pluviomètre

La figure A.5 présente sous forme d'histogramme les précipitations mesurées par le pluviomètre positionné sur la cellule #2.

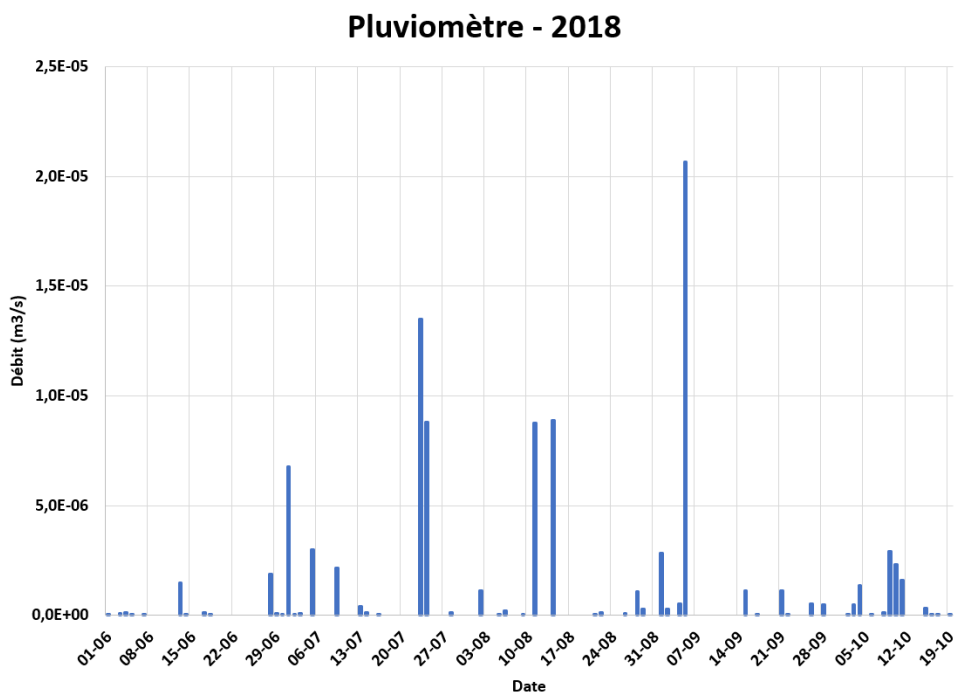


Figure A.5 : Suivi 2018 du pluviomètre

### A.1.4 Débit

Le débit d'exfiltration a été mesuré en continu lors de la période de suivi. Pour la cellule #1, la mesure ne semble pas s'être correctement effectuée à certaines périodes, malgré le redémarrage de l'appareil de mesures à plusieurs reprises. Entre le 24 juillet et le 7 septembre, il n'y a donc pas de données de débit. Pour la cellule 2, les mesures sont complètes. La figure A.6 représente graphiquement les données de débit pour les deux cellules, ainsi que les données du pluviomètre pour comparaison.

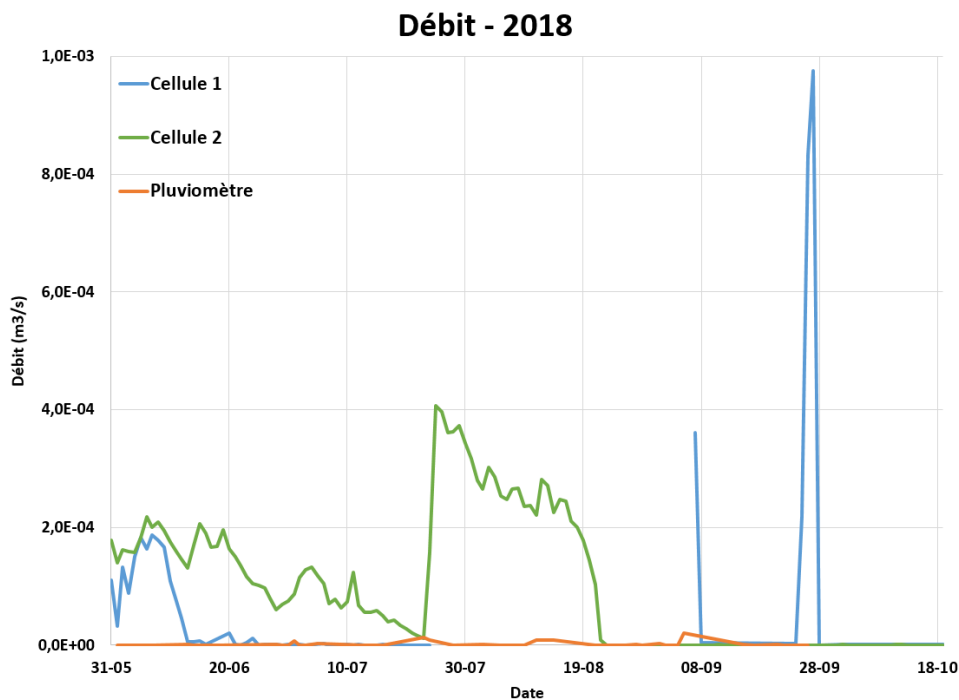


Figure A.6 : Suivi 2018 des débits d'exfiltration des cellules #1 et #2

### A.1.5 Station météo

La station météo a été calibrée de manière à prendre des données horaires. Les données ont été mesurées du 11 juillet au 19 octobre 2018. Les données mesurées sont la vitesse (m/s) et la direction ( $^{\circ}$ ) du vent ainsi que les rafales (m/s), la température ( $^{\circ}\text{C}$ ), l'humidité relative (%) et la pression (mbar). La figure A.7 montre l'évolution des températures, de la vitesse du vent et de l'humidité relative pendant la période de suivi.

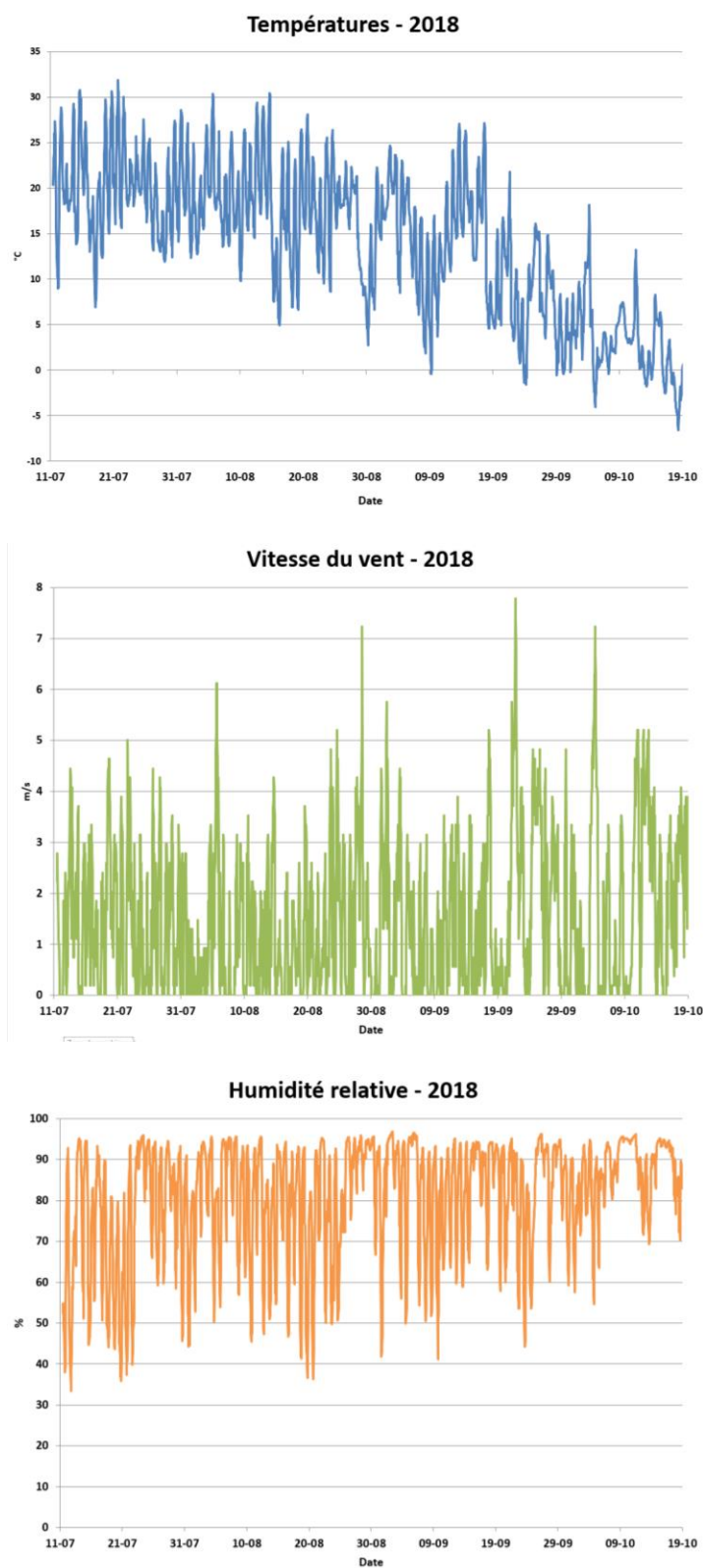


Figure A.7 : Suivi 2018 des températures, de la vitesse du vent et de l'humidité relative sur le site  
Doyon-Westwood

## **A.2 Suivi géochimique**

Les résultats pour les deux cellules de pH, Eh, conductivité, alcalinité, acidité ainsi que les analyses ICP-AES sont présentées aux tableaux A.1 à A.4. Ces mêmes résultats sont également représentés graphiquement aux figures A.8 à A.17. Les résultats sont présentés par ordre chronologique sur les graphiques pour la cellule #1, puis pour la cellule #2.

Tableau A.1 : Résultats du suivi géochimique – Cellule #1

N° Ech.	N°	Date	pH	Conductivité (mS/cm)	Eh relatif (mV)	Acidité totale (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	Alcalinité totale (mg CaCO <sub>3</sub> /L)
	<i>LDM</i>	-	-	-	-	<i>l</i>	<i>l</i>
U74454	1	2018-05-31	6,66	2,2	240	-	-
U73834	2	2018-06-13	6,99	0,007	597	3	9
U74258	3	2018-06-28	6,4	2,36	469	8	12
U74578	4	2018-07-11	8,41	2,394	538	2	20
U74922	5	2018-07-24	7,74	2,41	451	4	18
-	6	2018-08-08	-	-	-	-	-
U75842	7	2018-08-22	8,44	2,405		<1	28,6
U76274	8	2018-09-04	8,81	2,412	512	<1	21
U76763	9	2018-09-19	8,83	2,224	392	<1	23
U77079	10	2018-10-02	8,82	2,238		<1	18,2
U77587	11	2018-10-19	7,8	2,256	391	<1	20,5

Tableau A.2: Résultats du suivi géochimique – Cellule #2

N° Ech.	N°	Date	pH	Conductivité (mS/cm)	Eh relatif (mV)	Acidité totale (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	Alcalinité totale (mg CaCO <sub>3</sub> /L)
	<i>LDM</i>	-	-	-	-	<i>l</i>	<i>l</i>
U74455	1	2018-05-31	6,73	2,2	223	-	-
U73835	2	2018-06-13	6,5	2,113	627	3	7
U74259	3	2018-06-28	6,37	2,31	473	8	14
U74579	4	2018-07-11	7,01	2,346	580	3	13
U74923	5	2018-07-24	7,27	2,21	457	6	19
-	6	2018-08-08	-	-	-	-	-
U75843	7	2018-08-22	7,27	2,385	-	3	22,1
U76275	8	2018-09-04	8,04	2,371	388	1	20
U76764	9	2018-09-19	8,00	2,199	415	2	21
U77080	10	2018-10-02	8,43	2,238	-	6	18
U77588	11	2018-10-19	7,85	2,277	374	4	20



Tableau A.3 : Résultats du suivi géochimique – Cellule #1 (suite)

N°	Éléments (mg/L)																									
Ech.	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	Pb	S	Se	Si	Sr	Te	Ti	Zn
LDM	0,010	0,060	0,001	0,001	0,020	0,030	0,003	0,004	0,003	0,003	0,006	n/d	0,003	0,001	0,002	0,009	n/d	0,004	0,020	0,090	0,100	0,040	n/d	n/d	0,002	0,005
1	0,064	<0,06	0,039	<0,001	<0,02	535	<0,003	0,026	<0,003	0,003	0,322	17,8	<0,003	2,52	0,035	0,029	26,0	0,009	<0,02	553	<0,1	1,16	6,46	0,003	<0,002	0,229
2	0,122	<0,06	0,034	<0,001	<0,02	526	<0,003	0,012	<0,003	0,003	0,123	18,0	<0,003	1,92	0,024	<0,009	24,0	0,008	<0,02	538	<0,1	1,66	6,56	0,006	<0,002	0,128
3	0,087	<0,06	0,031	<0,001	<0,02	548	<0,003	0,020	<0,003	<0,003	0,088	19,7	<0,003	1,89	0,025	0,017	24,1	0,007	<0,02	557	<0,1	1,60	6,87	0,003	<0,002	0,127
4	0,276	<0,06	0,029	<0,001	<0,02	578	<0,003	0,030	<0,003	<0,003	0,111	21,9	<0,003	1,85	0,022	0,055	25,4	0,007	<0,02	575	<0,1	0,989	6,98	0,007	<0,002	0,037
5	0,229	<0,06	0,028	<0,001	<0,02	576	<0,003	0,031	<0,003	<0,003	0,134	22,7	0,003	1,71	0,025	0,053	27,8	0,008	<0,02	580	<0,1	1,16	9,46	0,007	<0,002	0,035
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	0,219	<0,06	0,020	<0,001	<0,02	537	<0,003	0,033	<0,003	<0,003	0,088	23,3	<0,003	1,42	0,024	0,037	23,8	0,008	<0,02	540	<0,1	1,12	8,10	0,004	<0,002	0,056
8	0,278	<0,06	0,018	<0,001	<0,02	566	<0,003	0,032	<0,003	<0,003	0,146	24,7	<0,003	1,56	0,025	0,033	24,5	0,006	<0,02	613	<0,1	1,23	7,77	0,004	<0,002	0,104
9	0,233	<0,06	0,015	<0,001	<0,02	572	<0,003	0,023	<0,003	<0,003	0,141	19,9	<0,003	1,55	0,023	0,040	18,2	0,006	<0,02	579	<0,1	1,18	5,99	0,004	<0,002	0,079
10	0,288	<0,06	0,016	<0,001	<0,02	564	<0,003	0,028	<0,003	<0,003	0,120	23,4	<0,003	1,73	0,019	0,038	23,8	0,008	<0,02	581	<0,1	1,17	8,98	0,002	<0,002	0,067
11	0,254	<0,06	0,017	<0,001	<0,02	556	<0,003	0,033	<0,003	<0,003	0,128	21,1	<0,003	1,70	0,021	0,029	21,3	0,008	<0,02	570	<0,1	1,08	6,99	0,017	<0,002	0,110

Tableau A.4 : Résultats du suivi géochimique – Cellule #2 (suite)

N°	Éléments (mg/L)																									
Ech.	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	Pb	S	Se	Si	Sr	Te	Ti	Zn
LDM	0,010	0,060	0,001	0,001	0,020	0,030	0,003	0,004	0,003	0,003	0,006	n/d	0,003	0,001	0,002	0,009	n/d	0,004	0,020	0,090	0,100	0,040	n/d	n/d	0,002	0,005
1	0,049	<0,06	0,023	<0,001	<0,02	537	<0,003	0,007	<0,003	<0,003	0,160	17,7	<0,003	3,30	0,034	<0,009	16,8	0,007	<0,02	549	<0,1	1,11	5,70	0,004	<0,002	0,170
2	0,059	<0,06	0,025	<0,001	<0,02	528	<0,003	0,004	<0,003	<0,003	0,078	18,0	<0,003	2,76	0,034	0,031	16,3	0,007	<0,02	539	<0,1	1,62	5,86	0,006	<0,002	0,121
3	0,050	<0,06	0,020	<0,001	<0,02	536	<0,003	0,008	<0,003	<0,003	0,080	19,1	<0,003	2,60	0,037	<0,009	17,4	0,007	<0,02	554	<0,1	1,67	6,00	0,004	<0,002	0,129
4	0,045	<0,06	0,020	<0,001	<0,02	567	<0,003	0,013	<0,003	<0,003	0,077	21,7	<0,003	2,54	0,041	0,065	18,3	0,007	<0,02	580	<0,1	1,16	6,09	0,008	<0,002	0,037
5	0,026	<0,06	0,017	<0,001	<0,02	497	<0,003	0,007	<0,003	0,012	0,096	18,5	<0,003	2,16	0,039	0,055	16,8	0,008	<0,02	502	<0,1	1,15	7,47	0,004	<0,002	0,032
6																										
7	0,025	<0,06	0,013	<0,001	<0,02	440	<0,003	0,006	<0,003	<0,003	0,076	18,0	<0,003	1,58	0,036	0,033	15,3	0,007	<0,02	428	<0,1	0,980	5,99	0,000	<0,002	0,048
8	0,217	<0,06	0,016	<0,001	<0,02	563	<0,003	0,016	<0,003	<0,003	0,129	23,8	<0,003	2,15	0,048	0,043	20,5	0,006	<0,02	613	<0,1	1,32	7,01	0,004	<0,002	0,095
9	0,207	<0,06	0,014	<0,001	<0,02	551	<0,003	0,012	<0,003	<0,003	0,123	19,9	<0,003	2,08	0,036	0,053	16,2	0,006	<0,02	589	<0,1	1,31	5,25	0,006	<0,002	0,081
10	0,255	<0,06	0,014	<0,001	<0,02	561	<0,003	0,016	<0,003	<0,003	0,109	23,5	<0,003	1,90	0,029	0,049	21,4	0,007	<0,02	578	<0,1	1,28	8,30	0,002	<0,002	0,069
11	0,275	<0,06	0,012	<0,001	<0,02	568	<0,003	0,017	<0,003	<0,003	0,121	23,2	<0,003	1,74	0,022	0,056	19,7	0,008	<0,02	589	<0,1	1,23	6,70	0,012	<0,002	0,109

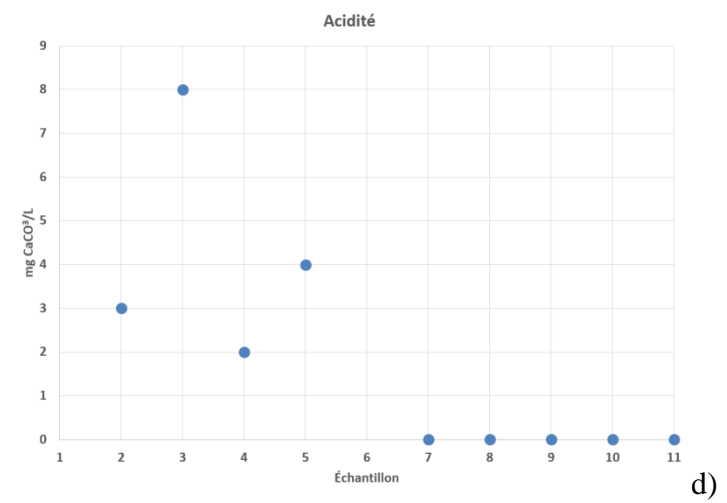
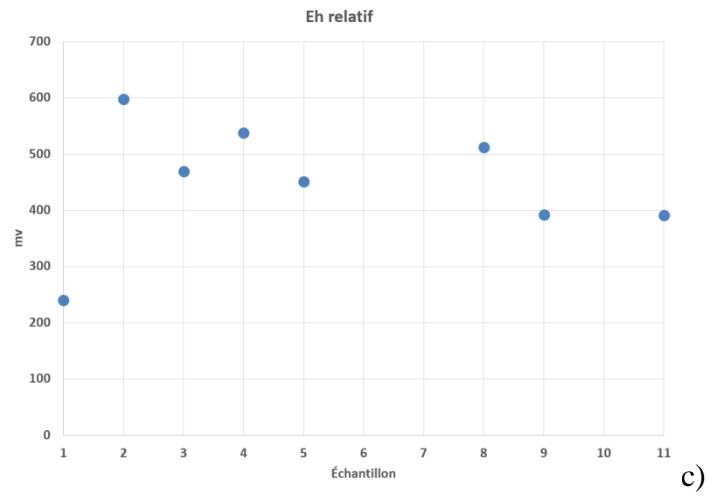
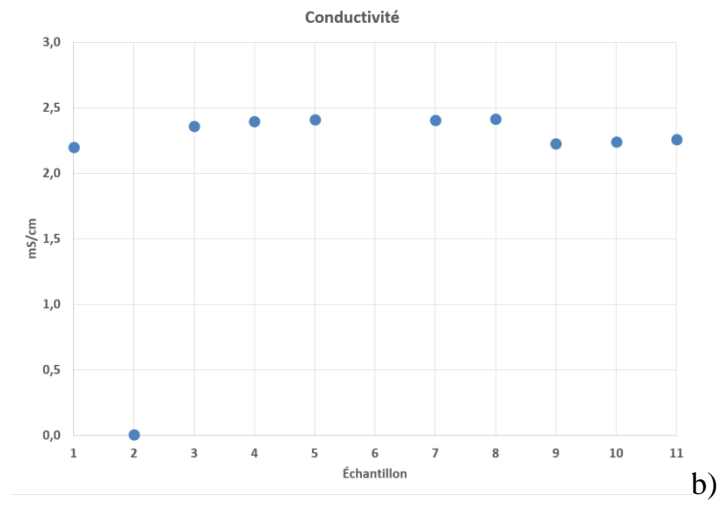
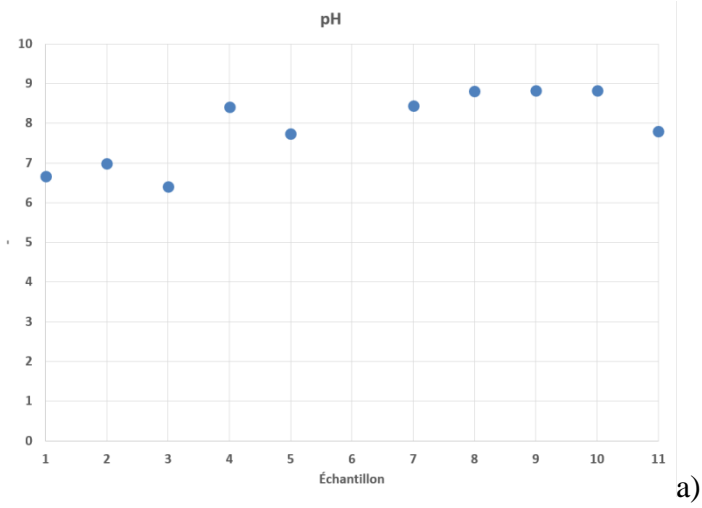


Figure A.8 : Résultats géochimiques – Cellule #1 – a) pH, b) Conductivité, c) Eh relatif, d) Acidité

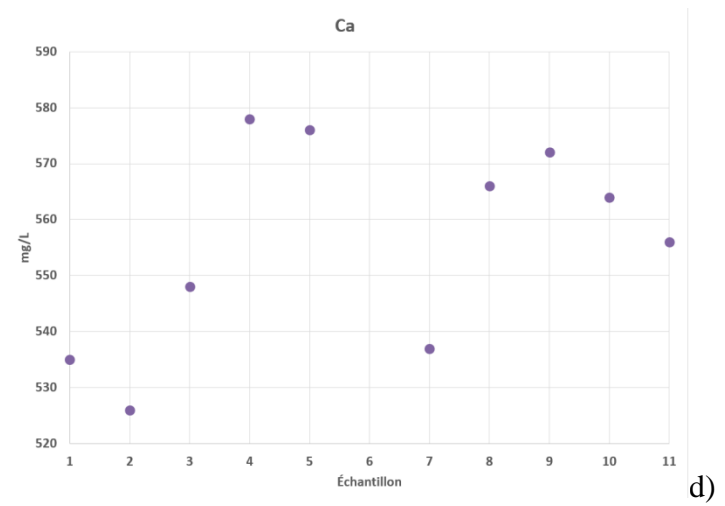
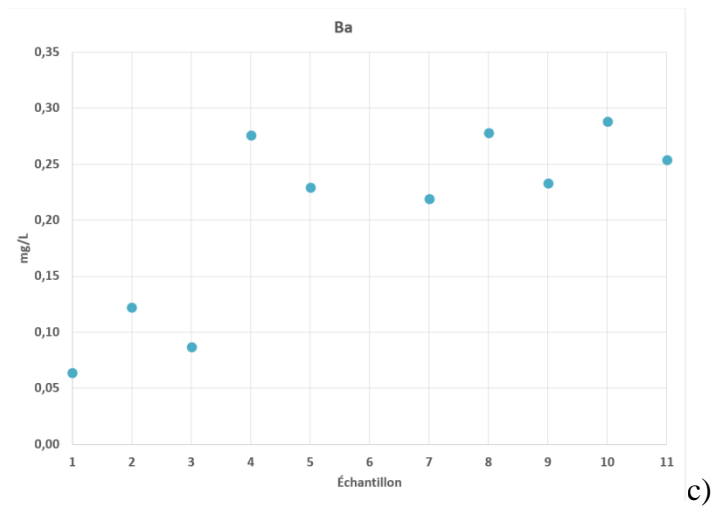
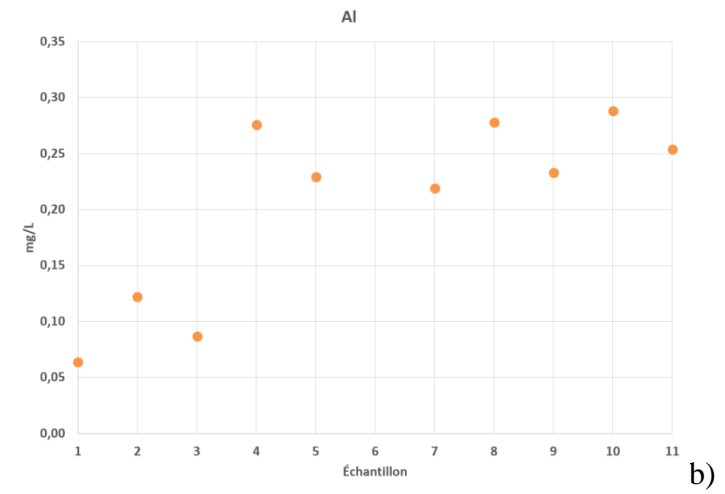
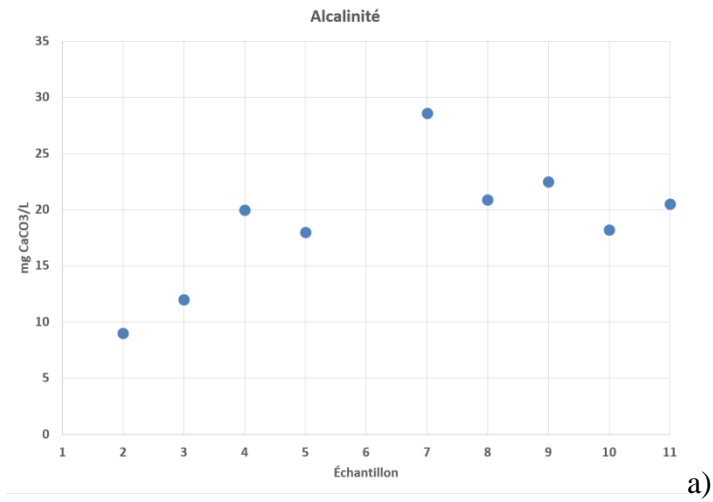


Figure A.9 : Résultats géochimiques – Cellule #1 – a) Alcalinité, b) Aluminium, c) Baryum, d) Calcium

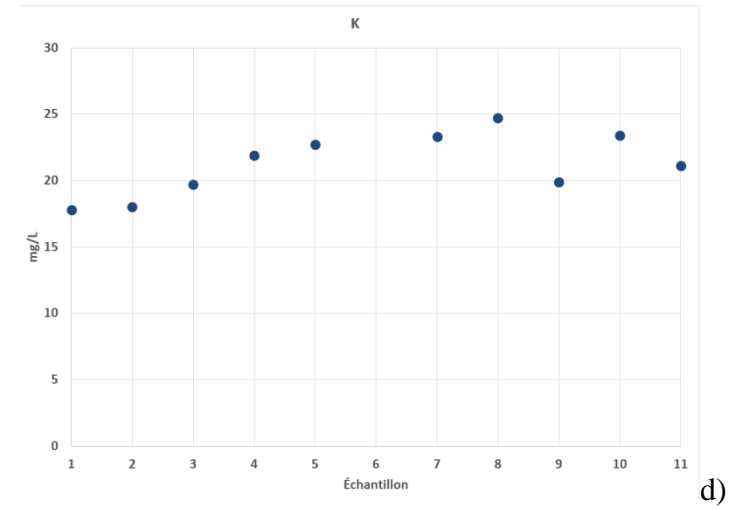
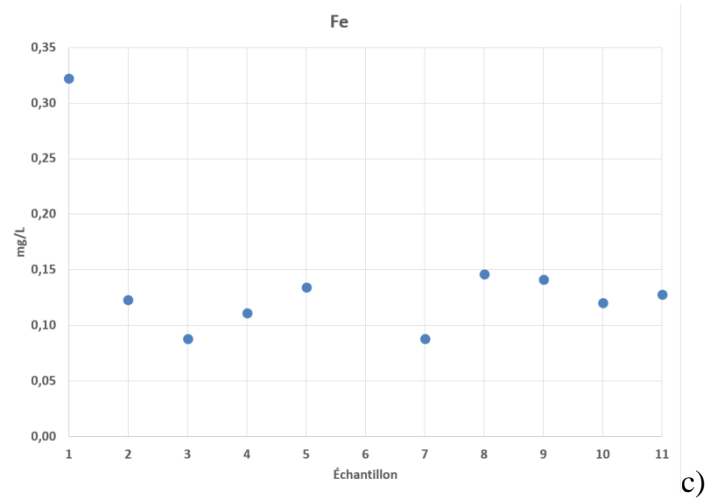
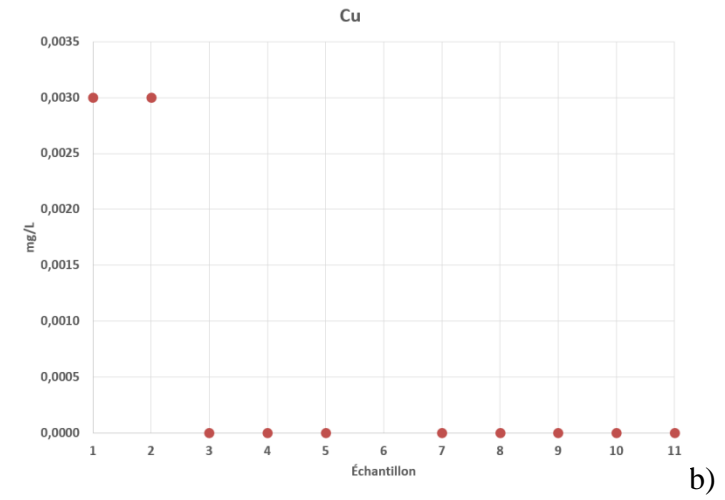
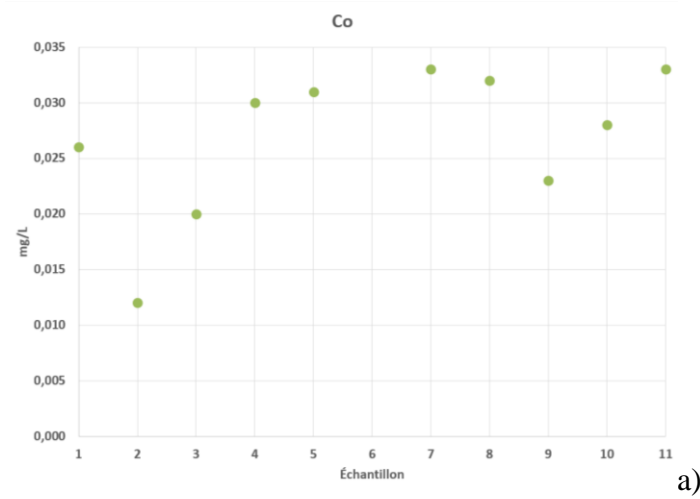


Figure A.10 : Résultats géochimiques – Cellule #1 – a) Cobalt, b) Cuivre, c) Fer, d) Potassium

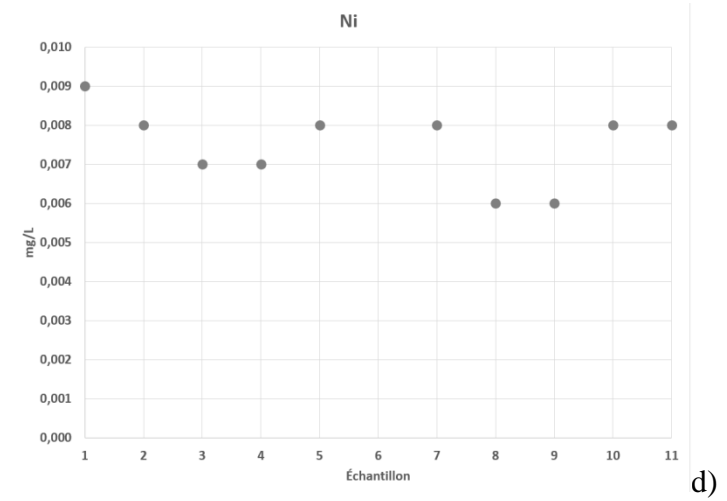
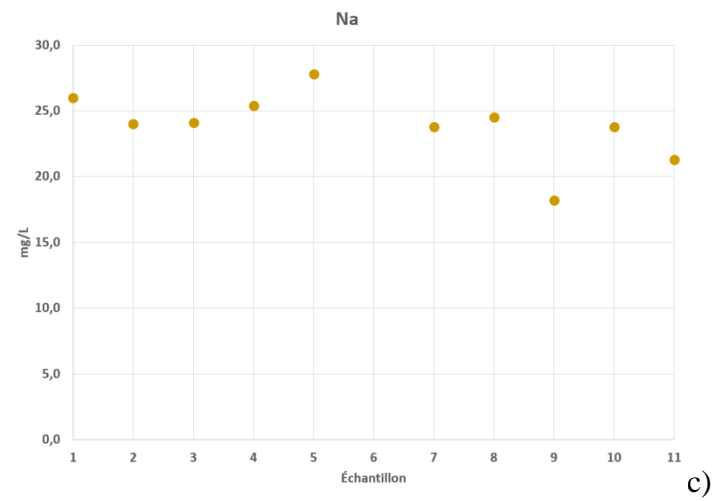
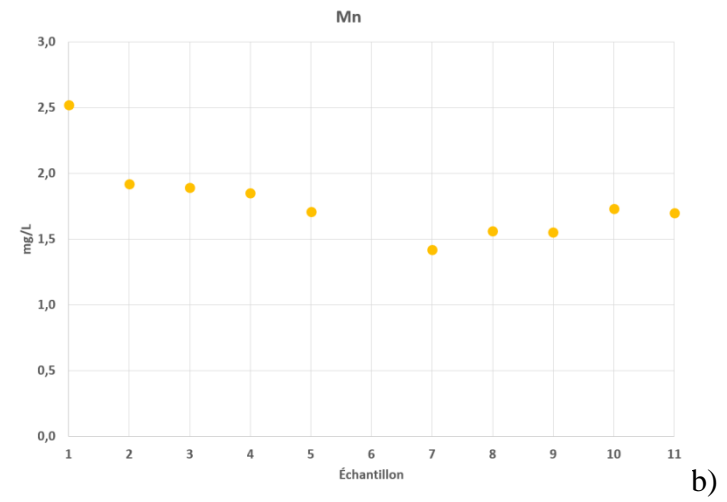
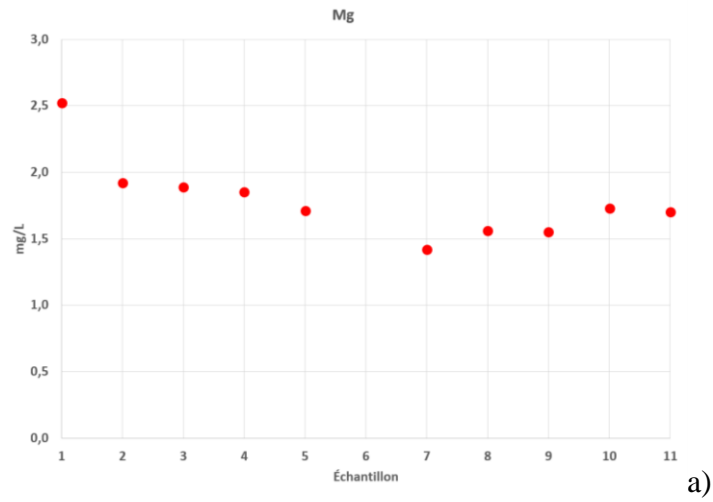


Figure A.11 : Résultats géochimiques – Cellule #1 – a) Magnésium, b) Manganèse, c) Sodium, d) Nickel

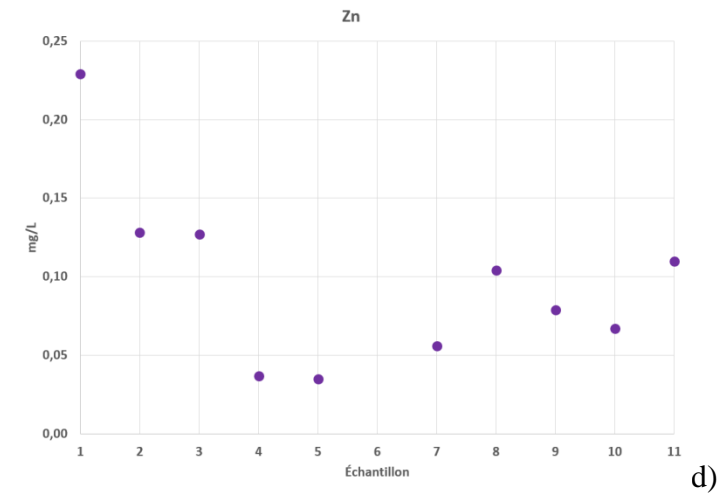
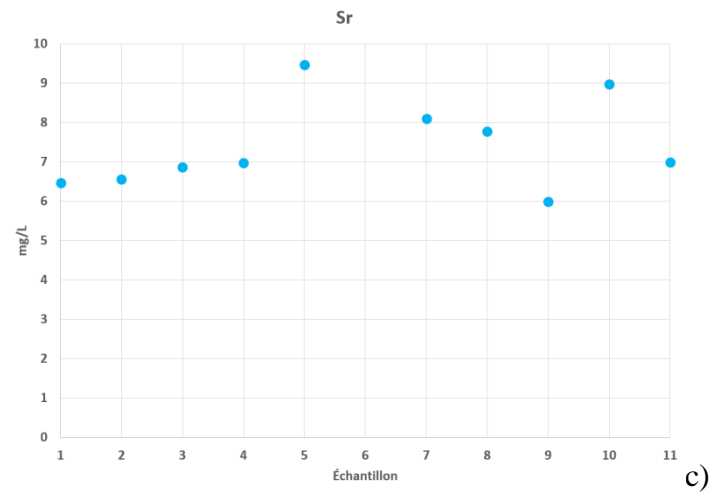
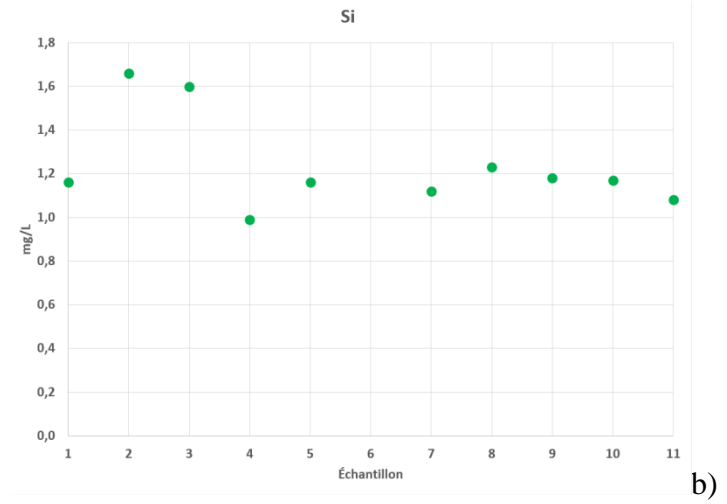
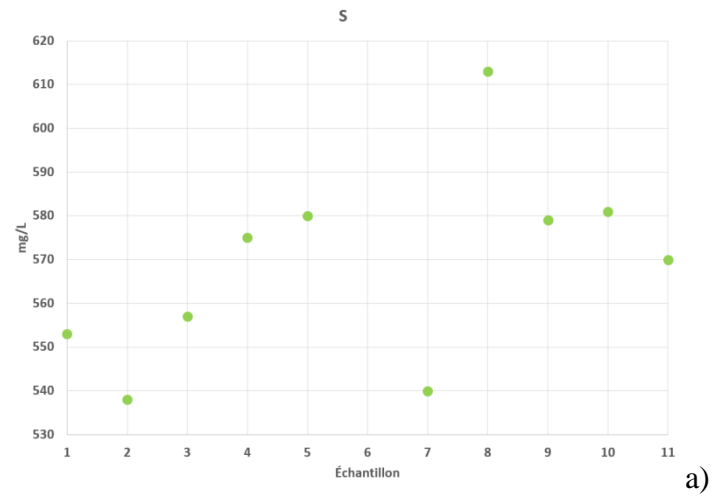


Figure A.12 : Résultats géochimiques – Cellule #1 – a) Soufre, b) Silicium, c) Strontium, d) Zinc

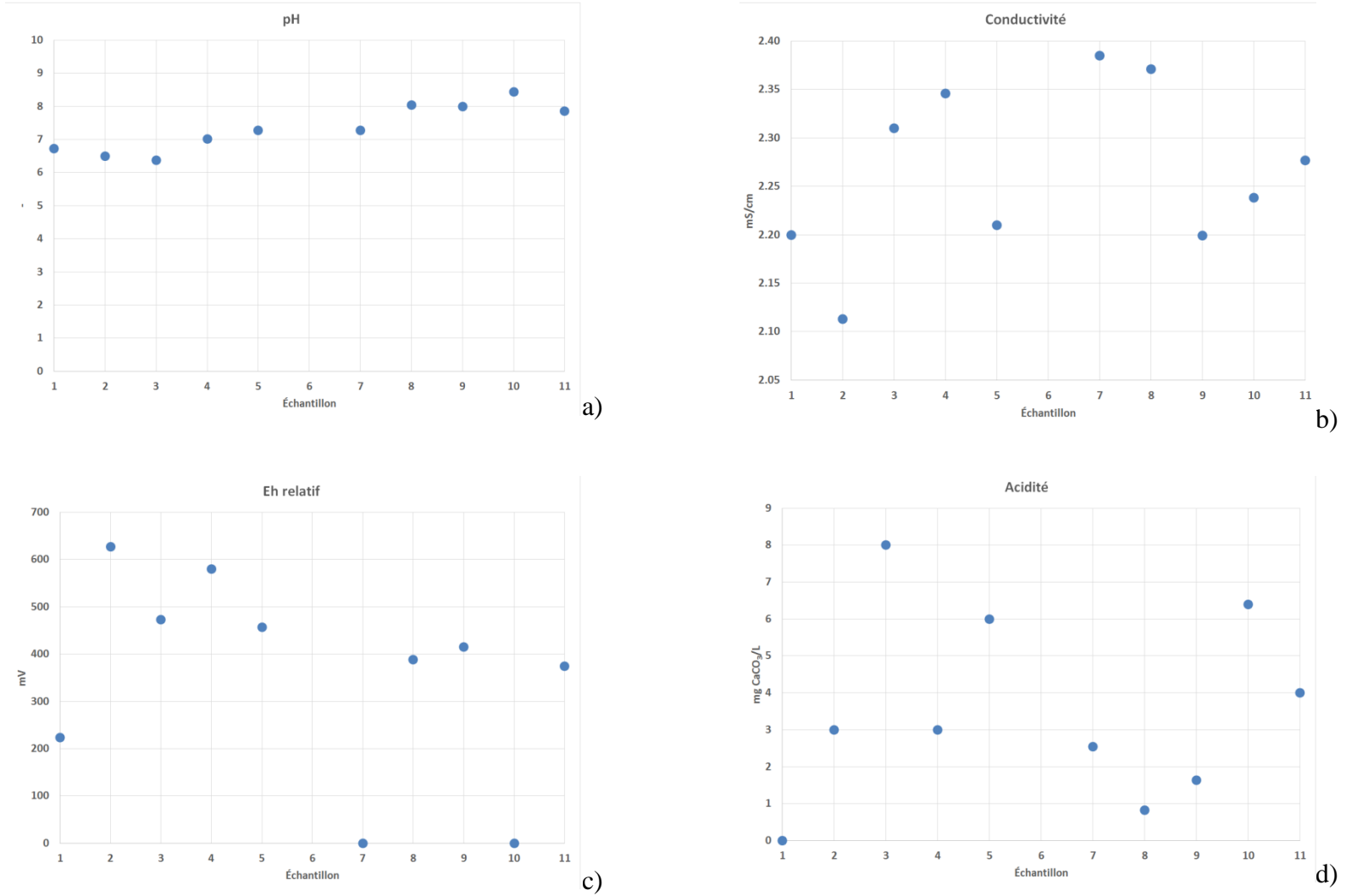


Figure A.13 : Résultats géochimiques – Cellule #2 – a) pH, b) Conductivité, c) Eh relatif, d) Acidité

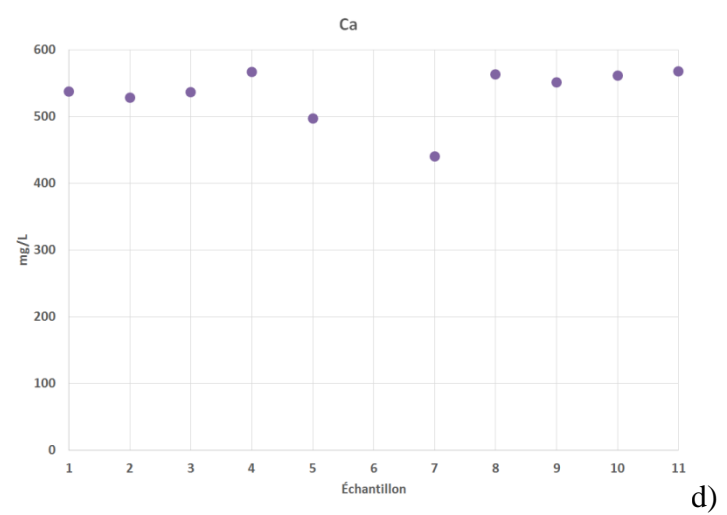
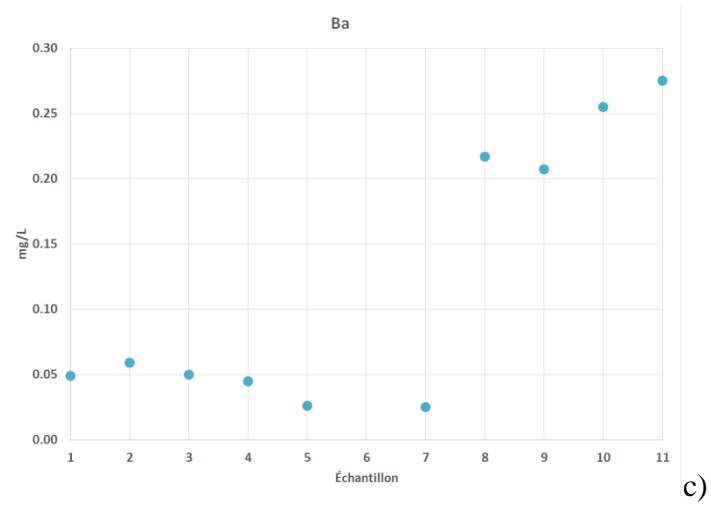
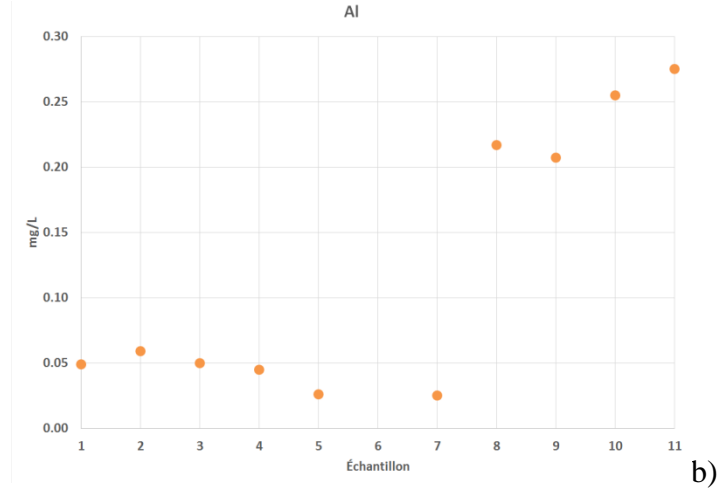
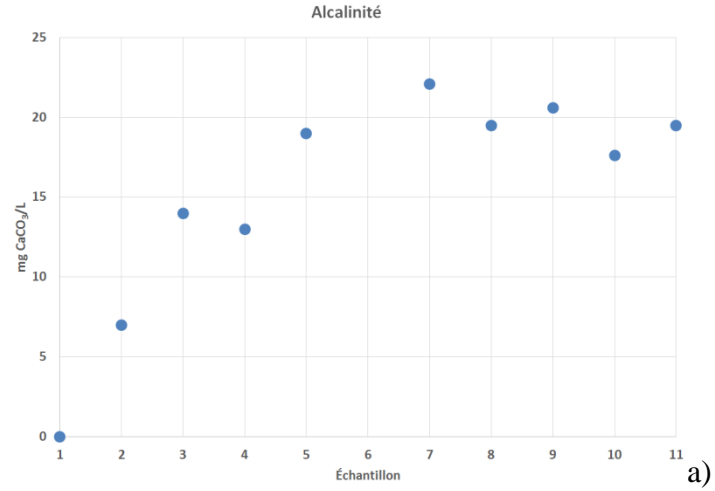


Figure A.14 : Résultats géochimiques – Cellule #2 – a) Alcalinité, b) Aluminium, c) Baryum, d) Calcium



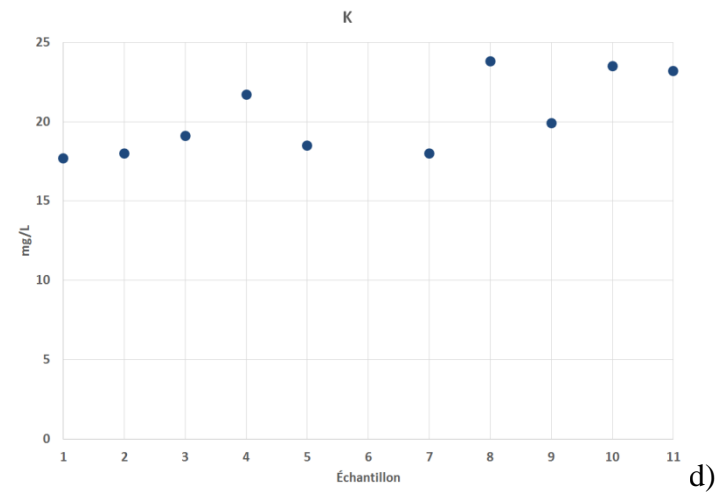
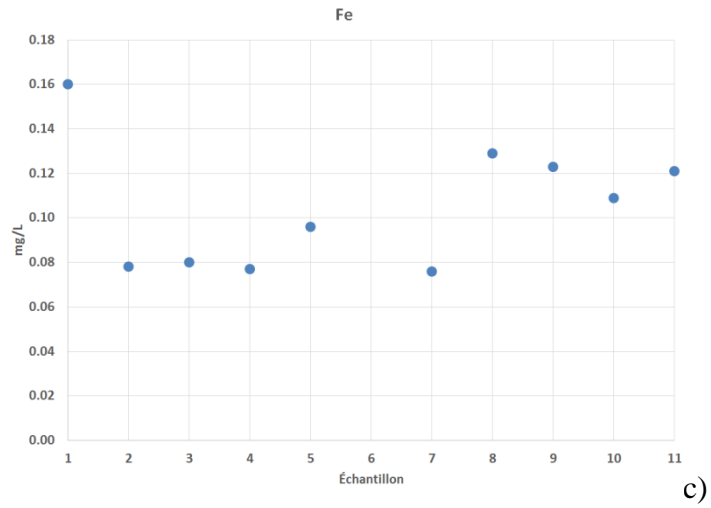
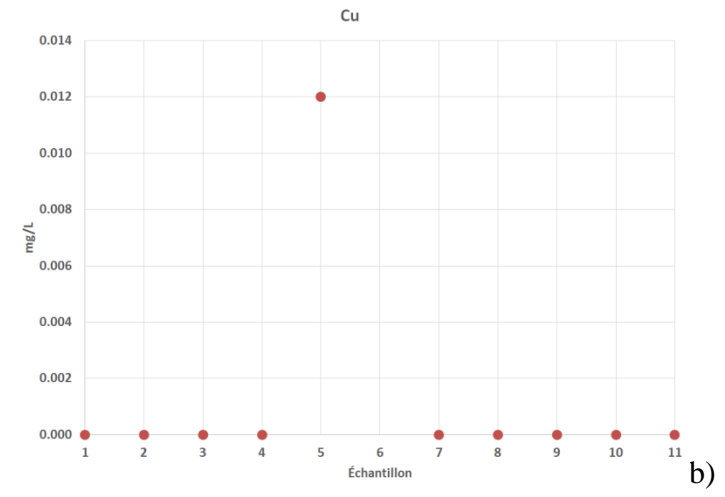
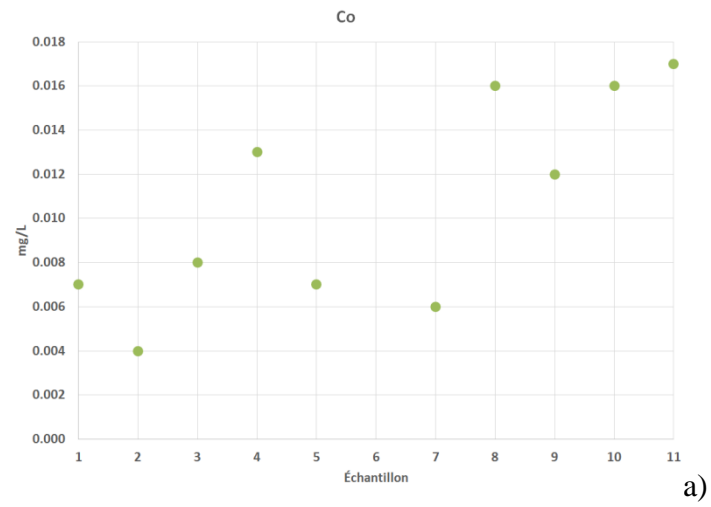


Figure A.15 : Résultats géochimiques – Cellule #2 – a) Cobalt, b) Cuivre, c) Fer, d) Potassium

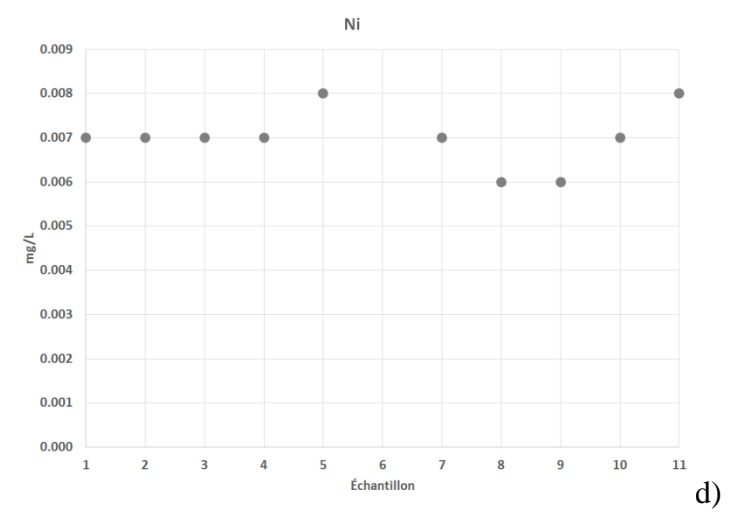
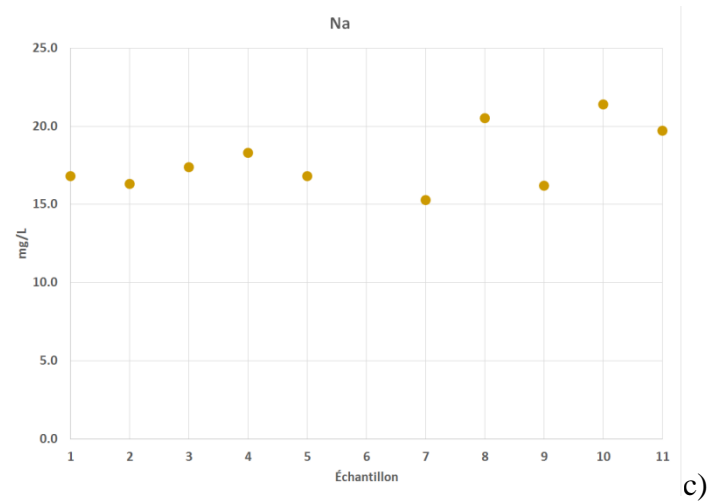
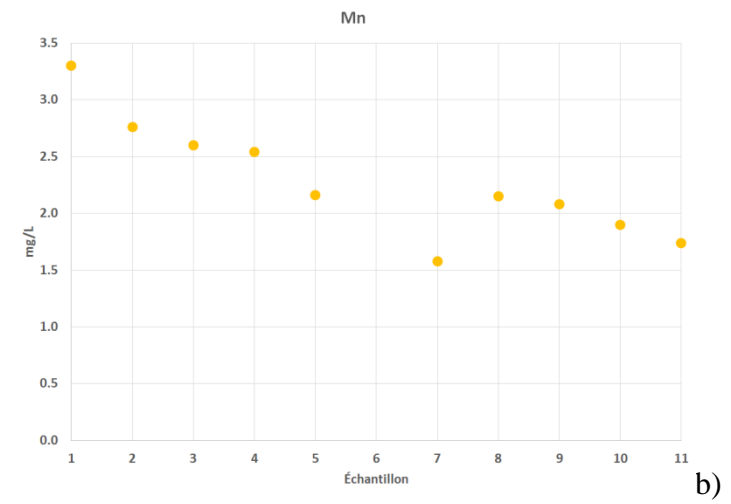
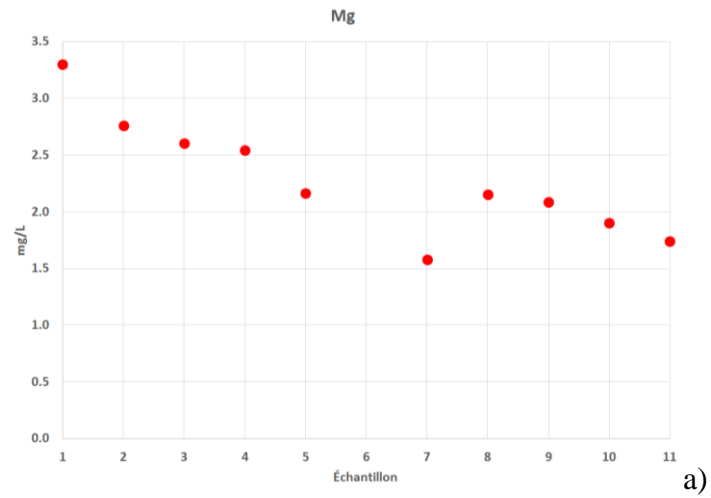


Figure A.16 : Résultats géochimiques – Cellule #2 – a) Magnésium, b) Manganèse, c) Sodium, d) Nickel

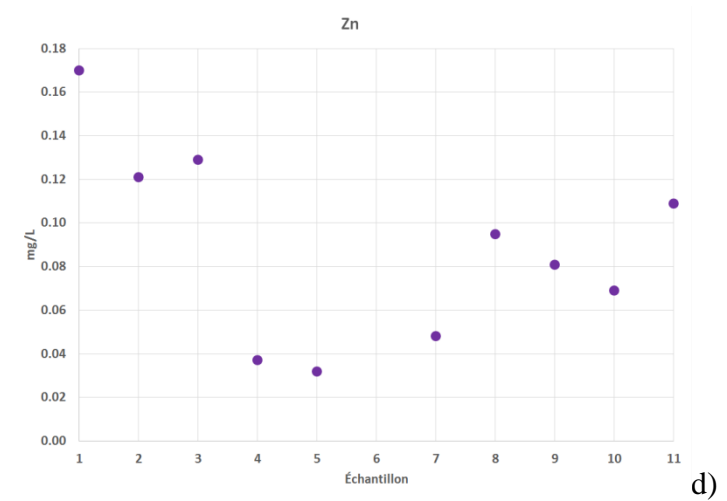
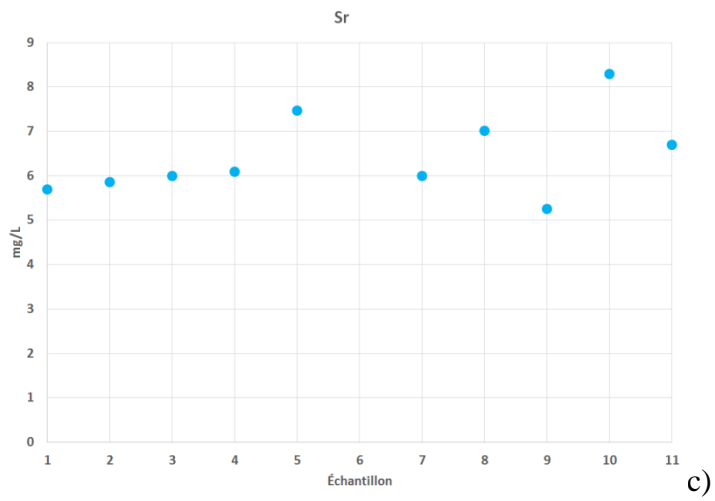
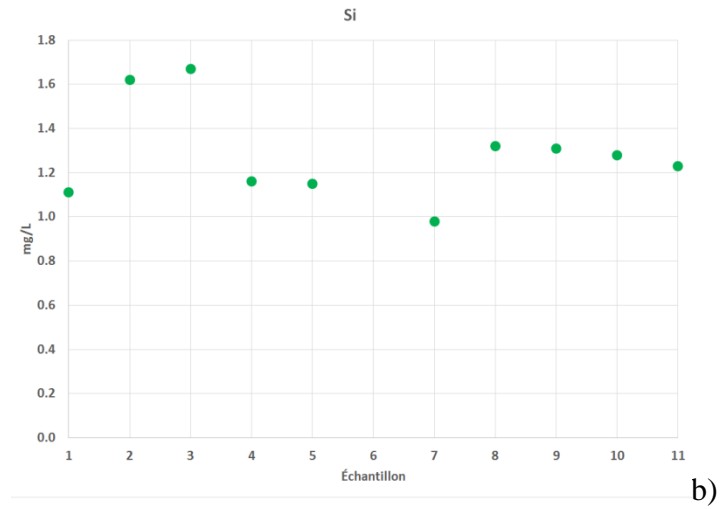
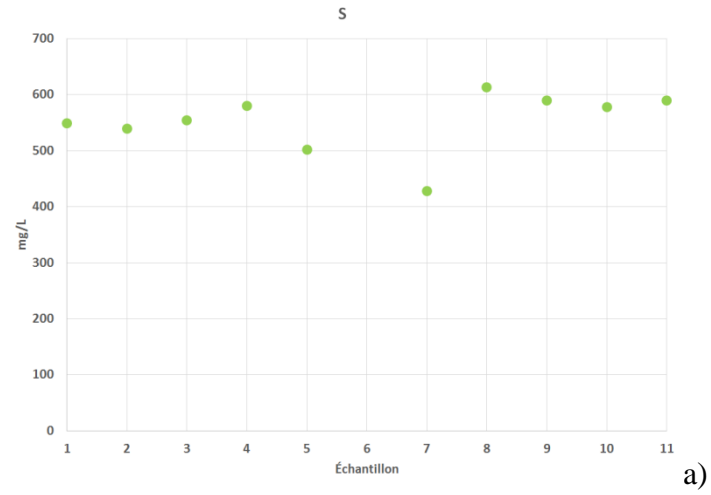


Figure A.17 : Résultats géochimiques – Cellule #2 – a) Soufre, b) Silicium, c) Strontium, d) Zinc

**ANNEXE B RÉSULTATS DES ESSAIS DE MESURES DE POROSITÉ IN  
SITU 2015 - SITE DOYON-WESTWOOD**

Tableau A.5 : Résultats - Méthode de l'anneau volumique - Cellule #1

Test Cylindre	Tare (g)	Tare + matériel humide (g)	Tare + matériel sec (g)	Masse cylindre vide (g)	Masse matériel humide (g)	Masse matériel sec (g)	Masse d'eau (g)	Hauteur du cylindre (cm)	Diamètre du cylindre (cm)	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Aire base du cylindre (cm <sup>2</sup> )	Volume totale du cylindre (cm <sup>3</sup> )	Volume sec Vs (cm <sup>3</sup> )	Volume des vides Vv (cm <sup>3</sup> )	Porosité (n)	Indice des vides (e)
<i>Cellule #1 Désulfuré Goldex couche #1</i>																
#7	2.52	206.67	188.42	48.23	204.15	185.90	18.25	4.8	5.2	2.718	21.24	101.94	68.40	33.54	0.33	0.49
#8	2.94	220.97	200.35	49.22	218.03	197.41	20.62	4.9	5.2	2.718	21.24	104.06	72.64	31.42	0.30	0.43
<i>Cellule #1 Désulfuré Goldex couche #2</i>																
#1	2.48	225.41	203.44	48.12	222.93	200.96	21.97	4.9	5.2	2.717	21.24	104.06	73.95	30.11	0.29	0.41
#2	2.51	211.93	191.73	47.26	209.42	189.22	20.20	4.8	5.2	2.717	21.24	101.94	69.63	32.31	0.32	0.46
<i>Cellule #1 Résidus sulfureux Doyon</i>																
#13	2.60	257.36	203.85	36.43	254.76	201.25	53.51	5.0	5.2	2.824	21.24	106.19	71.28	34.91	0.33	0.49
#14	2.75	246.78	186.71	36.85	244.03	183.96	60.07	5.0	5.2	2.824	21.24	106.19	65.15	41.03	0.39	0.63

Tableau A.6 : Résultats - Méthode de l'anneau volumique - Cellule #2

Test Cylindre	Tare (g)	Tare + matériel humide (g)	Tare + matériel sec (g)	Masse cylindre vide (g)	Masse matériel humide (g)	Masse matériel sec (g)	Masse d'eau (g)	Hauteur du cylindre (cm)	Diamètre du cylindre (cm)	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Aire base du cylindre (cm <sup>2</sup> )	Volume totale du cylindre (cm <sup>3</sup> )	Volume sec Vs (cm <sup>3</sup> )	Volume des vides Vv (cm <sup>3</sup> )	Porosité (n)	Indice des vides (e)
<i>Cellule #2 Désulfuré Goldex couche #1</i>																
#9	2.90	224.18	202.18	48.72	221.28	199.28	22.00	4.8	5.2	2.717	21.24	101.94	73.33	28.60	0.28	0.39
#10	2.92	219.19	196.24	48.61	216.27	193.32	22.95	4.9	5.2	2.717	21.24	104.06	71.14	32.92	0.32	0.46
<i>Cellule #2 Désulfuré Goldex couche #2</i>																
#11	2.92	212.15	195.39	48.42	209.23	192.47	16.76	4.9	5.2	2.719	21.24	104.06	70.79	33.28	0.32	0.47
#12	2.77	207.18	190.73	47.94	204.41	187.96	16.45	4.8	5.2	2.719	21.24	101.94	69.13	32.81	0.32	0.47
<i>Cellule #2 Résidus sulfureux Doyon</i>																
#15	2.67	270.93	225.07	37.66	268.26	222.40	45.86	5.1	5.2	2.799	21.24	108.31	79.46	28.85	0.27	0.36
#16	2.69	259.56	206.98	36.02	256.87	204.29	52.58	5.0	5.2	2.799	21.24	106.19	72.99	33.20	0.31	0.45

**ANNEXE C DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES DE LA STATION DE  
ROUYN-NORANDA AÉROPORT (24-07-2015 AU 19-10-2018)**

Tableau A.7 : Moyennes journalières - Juillet 2015

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2015-07-24	204	20.2	0	0.00E+00	6.79	1.89	61.96	0.62	0.1
2015-07-25	205	19.2	4.2	4.86E-08	9.79	2.72	89.50	0.90	0.1
2015-07-26	206	22.4	0	0.00E+00	8.50	2.36	74.33	0.74	0.1
2015-07-27	207	23.5	0	0.00E+00	7.79	2.16	69.29	0.69	0.1
2015-07-28	208	24.6	0	0.00E+00	7.00	1.94	72.50	0.73	0.1
2015-07-29	209	26.1	0	0.00E+00	13.96	3.88	63.25	0.63	0.1
2015-07-30	210	20.2	1.4	1.62E-08	15.88	4.41	76.58	0.77	0.1
2015-07-31	211	19.1	2.6	3.01E-08	11.58	3.22	81.75	0.82	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.8 : Moyennes journalières - Aout 2015

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2015-08-01	212	17.5	7.4	8.56E-08	10.00	2.78	79.88	0.80	0.1
2015-08-02	213	16.9	23.3	2.70E-07	11.25	3.13	90.83	0.91	0.1
2015-08-03	214	16.6	6.4	7.41E-08	7.08	1.97	89.50	0.90	0.1
2015-08-04	215	15.4	23.2	2.69E-07	9.71	2.70	92.29	0.92	0.1
2015-08-05	216	14.4	7.4	8.56E-08	14.13	3.92	91.79	0.92	0.1
2015-08-06	217	14.0	0	0.00E+00	10.50	2.92	84.33	0.84	0.1
2015-08-07	218	15.5	0	0.00E+00	8.38	2.33	77.08	0.77	0.1
2015-08-08	219	15.9	0	0.00E+00	6.50	1.81	72.88	0.73	0.1
2015-08-09	220	18.7	0	0.00E+00	7.71	2.14	65.67	0.66	0.1
2015-08-10	221	18.8	0	0.00E+00	11.50	3.19	75.75	0.76	0.1
2015-08-11	222	16.5	1.2	1.39E-08	12.83	3.56	88.50	0.89	0.1
2015-08-12	223	14.4	0	0.00E+00	12.58	3.50	81.21	0.81	0.1
2015-08-13	224	17.4	12.7	1.47E-07	10.25	2.85	76.92	0.77	0.1
2015-08-14	225	21.9	0	0.00E+00	8.46	2.35	75.71	0.76	0.1
2015-08-15	226	22.2	0	0.00E+00	9.54	2.65	64.13	0.64	0.1
2015-08-16	227	23.9	0	0.00E+00	16.88	4.69	70.79	0.71	0.1
2015-08-17	228	19.7	1.9	2.20E-08	11.42	3.17	80.00	0.80	0.1
2015-08-18	229	14.4	9.2	1.06E-07	12.67	3.52	94.75	0.95	0.1
2015-08-19	230	20.6	0	0.00E+00	12.50	3.47	87.88	0.88	0.1
2015-08-20	231	19.4	19.2	2.22E-07	13.54	3.76	88.88	0.89	0.1
2015-08-21	232	16.6	0	0.00E+00	13.25	3.68	73.25	0.73	0.1
2015-08-22	233	17.0	0	0.00E+00	10.58	2.94	72.92	0.73	0.1
2015-08-23	234	19.8	0	0.00E+00	11.58	3.22	72.42	0.72	0.1
2015-08-24	235	16.2	9.6	1.11E-07	12.04	3.34	84.88	0.85	0.1
2015-08-25	236	14.4	5.8	6.71E-08	8.96	2.49	92.88	0.93	0.1
2015-08-26	237	12.7	2	2.31E-08	9.08	2.52	95.92	0.96	0.1
2015-08-27	238	15.1	1	1.16E-08	9.33	2.59	86.25	0.86	0.1
2015-08-28	239	16.3	0	0.00E+00	12.08	3.36	86.38	0.86	0.1
2015-08-29	240	17.8	1	1.16E-08	10.08	2.80	89.88	0.90	0.1
2015-08-30	241	18.6	0	0.00E+00	12.58	3.50	86.67	0.87	0.1
2015-08-31	242	20.8	0	0.00E+00	10.63	2.95	72.88	0.73	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)



Tableau A.9 : Moyennes journalières - Septembre 2015

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2015-09-01	243	21.1	0	0.00E+00	13.75	3.82	87.46	0.87	0.1
2015-09-02	244	21.9	0	0.00E+00	10.83	3.01	77.21	0.77	0.1
2015-09-03	245	17.5	0	0.00E+00	8.38	2.33	68.75	0.69	0.1
2015-09-04	246	17.9	0	0.00E+00	6.25	1.74	61.29	0.61	0.1
2015-09-05	247	19.3	0	0.00E+00	6.33	1.76	61.29	0.61	0.1
2015-09-06	248	22.0	0	0.00E+00	13.54	3.76	83.25	0.83	0.1
2015-09-07	249	20.4	1.4	1.62E-08	11.67	3.24	84.42	0.84	0.1
2015-09-08	250	19.5	11.6	1.34E-07	8.21	2.28	88.17	0.88	0.1
2015-09-09	251	15.5	0	0.00E+00	14.21	3.95	78.17	0.78	0.1
2015-09-10	252	14.4	0	0.00E+00	8.00	2.22	82.96	0.83	0.1
2015-09-11	253	10.1	0	0.00E+00	10.92	3.03	85.54	0.86	0.1
2015-09-12	254	8.5	0	0.00E+00	9.54	2.65	83.63	0.84	0.1
2015-09-13	255	11.3	0	0.00E+00	9.04	2.51	78.92	0.79	0.1
2015-09-14	256	14.9	1	1.16E-08	10.33	2.87	76.13	0.76	0.1
2015-09-15	257	18.7	0	0.00E+00	10.21	2.84	75.00	0.75	0.1
2015-09-16	258	21.1	0	0.00E+00	14.75	4.10	67.42	0.67	0.1
2015-09-17	259	22.1	0	0.00E+00	14.00	3.89	67.54	0.68	0.1
2015-09-18	260	15.5	2.8	3.24E-08	11.92	3.31	86.96	0.87	0.1
2015-09-19	261	9.0	40.4	4.68E-07	17.08	4.75	95.00	0.95	0.1
2015-09-20	262	11.6	0	0.00E+00	9.88	2.74	87.08	0.87	0.1
2015-09-21	263	15.7	1	1.16E-08	11.13	3.09	80.38	0.80	0.1
2015-09-22	264	15.3	0	0.00E+00	13.08	3.63	75.38	0.75	0.1
2015-09-23	265	12.7	0	0.00E+00	9.75	2.71	69.04	0.69	0.1
2015-09-24	266	10.2	0	0.00E+00	7.88	2.19	66.96	0.67	0.1
2015-09-25	267	11.8	1.6	1.85E-08	6.21	1.72	74.58	0.75	0.1
2015-09-26	268	11.9	0	0.00E+00	9.13	2.53	73.92	0.74	0.1
2015-09-27	269	15.3	0	0.00E+00	15.88	4.41	78.46	0.78	0.1
2015-09-28	270	17.1	15.6	1.81E-07	15.29	4.25	83.29	0.83	0.1
2015-09-29	271	8.2	0	0.00E+00	10.88	3.02	78.50	0.79	0.1
2015-09-30	272	6.6	0	0.00E+00	12.24	3.40	66.67	0.67	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.10 : Moyennes journalières - Octobre 2015

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2015-10-01	273	4.9	0	0.00E+00	12.29	3.41	66.17	0.66	0.1
2015-10-02	274	5.6	0	0.00E+00	11.67	3.24	64.33	0.64	0.1
2015-10-03	275	5.5	0	0.00E+00	12.79	3.55	59.96	0.60	0.1
2015-10-04	276	7.4	0	0.00E+00	7.96	2.21	70.63	0.71	0.1
2015-10-05	277	9.7	0	0.00E+00	5.67	1.57	77.17	0.77	0.1
2015-10-06	278	8.5	0	0.00E+00	9.83	2.73	87.96	0.88	0.1
2015-10-07	279	6.0	0	0.00E+00	13.75	3.82	72.71	0.73	0.1
2015-10-08	280	2.8	0	0.00E+00	8.00	2.22	81.33	0.81	0.1
2015-10-09	281	4.4	1.6	1.85E-08	10.71	2.97	88.25	0.88	0.1
2015-10-10	282	3.5	4.4	5.09E-08	11.42	3.17	85.67	0.86	0.1
2015-10-11	283	14.4	0	0.00E+00	13.04	3.62	81.13	0.81	0.1
2015-10-12	284	15.1	0	0.00E+00	12.21	3.39	82.04	0.82	0.1
2015-10-13	285	8.0	2.4	2.78E-08	12.79	3.55	93.71	0.94	0.1
2015-10-14	286	1.7	7.8	9.03E-08	12.79	3.55	87.29	0.87	0.1
2015-10-15	287	4.2	2.2	2.55E-08	7.04	1.96	94.29	0.94	0.1
2015-10-16	288	0.4	0	0.00E+00	11.17	3.10	93.75	0.94	0.1
2015-10-17	289	-2.0	2	2.31E-08	13.67	3.80	81.63	0.82	0.8
2015-10-18	290	-3.9	1.1	1.27E-08	8.21	2.28	75.50	0.76	0.8
2015-10-19	291	4.0	0	0.00E+00	21.04	5.84	73.92	0.74	0.1
2015-10-20	292	2.3	0	0.00E+00	13.42	3.73	61.13	0.61	0.1
2015-10-21	293	-0.2	16.6	1.92E-07	12.33	3.43	76.13	0.76	0.8
2015-10-22	294	3.2	1.2	1.39E-08	21.33	5.93	89.42	0.89	0.1
2015-10-23	295	1.8	0	0.00E+00	11.08	3.08	75.50	0.76	0.1
2015-10-24	296	3.7	17.2	1.99E-07	15.00	4.17	85.79	0.86	0.1
2015-10-25	297	0.2	1.4	1.62E-08	15.54	4.32	91.13	0.91	0.1
2015-10-26	298	1.3	1	1.16E-08	9.33	2.59	77.29	0.77	0.1
2015-10-27	299	3.4	0	0.00E+00	7.67	2.13	69.54	0.70	0.1
2015-10-28	300	3.1	8.2	9.49E-08	17.58	4.88	89.54	0.90	0.1
2015-10-29	301	4.4	13.4	1.55E-07	18.42	5.12	96.92	0.97	0.1
2015-10-30	302	-0.2	1.2	1.39E-08	14.08	3.91	83.42	0.83	0.8
2015-10-31	303	1.8	6.4	7.41E-08	11.13	3.09	96.75	0.97	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.11 : Moyennes journalières - Novembre 2015

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2015-11-01	304	5.2	13.4	1.55E-07	14.04	3.90	97.46	0.97	0.1
2015-11-02	305	5.8	0	0.00E+00	8.83	2.45	91.29	0.91	0.1
2015-11-03	306	7.3	1.2	1.39E-08	10.46	2.91	86.29	0.86	0.1
2015-11-04	307	9.0	0	0.00E+00	10.33	2.87	85.00	0.85	0.1
2015-11-05	308	11.2	1	1.16E-08	13.17	3.66	92.38	0.92	0.1
2015-11-06	309	8.6	22.7	2.63E-07	23.79	6.61	85.33	0.85	0.1
2015-11-07	310	0.2	0	0.00E+00	13.92	3.87	70.42	0.70	0.1
2015-11-08	311	1.1	0	0.00E+00	15.54	4.32	77.58	0.78	0.1
2015-11-09	312	7.4	0	0.00E+00	16.67	4.63	73.38	0.73	0.1
2015-11-10	313	5.7	0	0.00E+00	6.13	1.70	85.13	0.85	0.1
2015-11-11	314	5.0	0	0.00E+00	6.50	1.81	78.75	0.79	0.1
2015-11-12	315	1.4	7.6	8.80E-08	12.08	3.36	99.08	0.99	0.1
2015-11-13	316	-1.7	1	1.16E-08	16.96	4.71	94.00	0.94	0.8
2015-11-14	317	-3.3	0	0.00E+00	16.42	4.56	87.08	0.87	0.5
2015-11-15	318	2.3	1	1.16E-08	13.00	3.61	85.54	0.86	0.1
2015-11-16	319	-1.7	0	0.00E+00	8.75	2.43	81.08	0.81	0.5
2015-11-17	320	-0.7	0	0.00E+00	12.21	3.39	74.58	0.75	0.5
2015-11-18	321	4.8	1	1.16E-08	18.38	5.10	75.67	0.76	0.1
2015-11-19	322	6.6	6.3	7.29E-08	26.63	7.40	83.46	0.83	0.1
2015-11-20	323	-0.1	0	0.00E+00	21.42	5.95	68.54	0.69	0.5
2015-11-21	324	-2.2	4.4	5.09E-08	8.46	2.35	80.96	0.81	0.8
2015-11-22	325	-6.5	2.6	3.01E-08	16.00	4.44	86.29	0.86	0.8
2015-11-23	326	-8.9	0	0.00E+00	7.63	2.12	79.96	0.80	0.5
2015-11-24	327	-5.6	1.2	1.39E-08	4.46	1.24	88.96	0.89	0.8
2015-11-25	328	-0.8	0	0.00E+00	13.04	3.62	89.83	0.90	0.5
2015-11-26	329	0.7	10.6	1.23E-07	15.42	4.28	92.42	0.92	0.5
2015-11-27	330	-8.9	4.2	4.86E-08	15.71	4.36	92.04	0.92	0.8
2015-11-28	331	-10.6	1	1.16E-08	11.46	3.18	93.13	0.93	0.8
2015-11-29	332	-9.9	0	0.00E+00	5.88	1.63	87.29	0.87	0.5
2015-11-30	333	-7.9	1.1	1.27E-08	11.58	3.22	92.88	0.93	0.8

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.12 : Moyennes journalières - Décembre 2015

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2015-12-01	334	-1.9	0	0.00E+00	9.63	2.67	96.29	0.96	0.5
2015-12-02	335	-0.1	1	1.16E-08	7.21	2.00	99.42	0.99	0.8
2015-12-03	336	-0.7	0.8	9.26E-09	13.96	3.88	88.70	0.89	0.5
2015-12-04	337	-1.3	1	1.16E-08	11.42	3.17	94.96	0.95	0.8
2015-12-05	338	3.4	0	0.00E+00	17.25	4.79	83.50	0.84	0.5
2015-12-06	339	2.7	0	0.00E+00	18.00	5.00	85.79	0.86	0.5
2015-12-07	340	-1.9	0	0.00E+00	9.00	2.50	81.13	0.81	0.5
2015-12-08	341	-2.3	0	0.00E+00	9.29	2.58	90.63	0.91	0.5
2015-12-09	342	2.2	7.6	8.80E-08	12.50	3.47	98.33	0.98	0.5
2015-12-10	343	3.7	3.4	3.94E-08	13.13	3.65	97.63	0.98	0.5
2015-12-11	344	3.3	4.1	4.75E-08	15.42	4.28	96.21	0.96	0.5
2015-12-12	345	-1.3	0	0.00E+00	8.75	2.43	92.21	0.92	0.5
2015-12-13	346	-2.7	10.2	1.18E-07	11.38	3.16	93.88	0.94	0.8
2015-12-14	347	-0.1	33.4	3.87E-07	8.88	2.47	100.00	1.00	0.8
2015-12-15	348	-3.9	1.4	1.62E-08	15.17	4.21	94.50	0.95	0.8
2015-12-16	349	-5.4	2.2	2.55E-08	10.67	2.96	95.83	0.96	0.8
2015-12-17	350	0.4	2.6	3.01E-08	12.67	3.52	97.29	0.97	0.5
2015-12-18	351	-4.6	0	0.00E+00	13.75	3.82	77.71	0.78	0.5
2015-12-19	352	-9.3	1	1.16E-08	18.33	5.09	79.79	0.80	0.8
2015-12-20	353	-6.9	2.4	2.78E-08	11.38	3.16	87.92	0.88	0.8
2015-12-21	354	-4.1	3.4	3.94E-08	8.92	2.48	97.13	0.97	0.8
2015-12-22	355	-6.1	0	0.00E+00	8.79	2.44	96.00	0.96	0.5
2015-12-23	356	1.7	2.4	2.78E-08	11.46	3.18	99.79	1.00	0.5
2015-12-24	357	6.1	1.1	1.27E-08	33.71	9.36	76.29	0.76	0.5
2015-12-25	358	-0.9	0	0.00E+00	11.83	3.29	77.29	0.77	0.5
2015-12-26	359	-4.0	1.2	1.39E-08	12.33	3.43	78.17	0.78	0.8
2015-12-27	360	-14.2	5.2	6.02E-08	13.96	3.88	87.25	0.87	0.8
2015-12-28	361	-19.8	0	0.00E+00	8.04	2.23	81.42	0.81	0.5
2015-12-29	362	-14.2	4.7	5.44E-08	19.83	5.51	88.17	0.88	0.8
2015-12-30	363	-12.5	3.5	4.05E-08	5.92	1.64	89.38	0.89	0.8
2015-12-31	364	-11.6	1.4	1.62E-08	7.79	2.16	89.58	0.90	0.8

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.13 : Moyennes journalières - Janvier 2016

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2016-01-01	365	-5.7	1	1.16E-08	16.04	4.46	85.54	0.86	0.8
2016-01-02	366	-5.8	5.8	6.71E-08	13.21	3.67	86.71	0.87	0.8
2016-01-03	367	-14.7	0	0.00E+00	16.71	4.64	75.21	0.75	0.5
2016-01-04	368	-20.5	0	0.00E+00	5.42	1.50	77.71	0.78	0.5
2016-01-05	369	-13.1	1	1.16E-08	21.04	5.84	78.33	0.78	0.8
2016-01-06	370	-2.2	0	0.00E+00	20.25	5.63	82.00	0.82	0.5
2016-01-07	371	-2.8	1	1.16E-08	7.83	2.18	92.38	0.92	0.8
2016-01-08	372	-1.5	0	0.00E+00	12.33	3.43	85.17	0.85	0.5
2016-01-09	373	-1.5	2.4	2.78E-08	10.67	2.96	90.25	0.90	0.8
2016-01-10	374	-8.5	28	3.24E-07	14.88	4.13	91.63	0.92	0.8
2016-01-11	375	-18.7	3.6	4.17E-08	18.54	5.15	75.54	0.76	0.8
2016-01-12	376	-18.4	1.2	1.39E-08	10.63	2.95	80.29	0.80	0.8
2016-01-13	377	-23.0	0	0.00E+00	8.83	2.45	74.79	0.75	0.5
2016-01-14	378	-19.7	1	1.16E-08	6.25	1.74	76.83	0.77	0.8
2016-01-15	379	-18.6	6.8	7.87E-08	13.46	3.74	79.46	0.79	0.8
2016-01-16	380	-16.5	5.6	6.48E-08	13.33	3.70	79.71	0.80	0.8
2016-01-17	381	-18.2	1	1.16E-08	6.38	1.77	78.88	0.79	0.8
2016-01-18	382	-20.3	1.6	1.85E-08	14.21	3.95	75.13	0.75	0.8
2016-01-19	383	-14.8	1.2	1.39E-08	19.58	5.44	79.33	0.79	0.8
2016-01-20	384	-13.1	0	0.00E+00	6.46	1.79	82.63	0.83	0.5
2016-01-21	385	-12.9	0	0.00E+00	4.38	1.22	82.50	0.83	0.5
2016-01-22	386	-13.4	0	0.00E+00	8.13	2.26	82.00	0.82	0.5
2016-01-23	387	-17.3	0	0.00E+00	5.96	1.66	77.13	0.77	0.5
2016-01-24	388	-9.2	1.2	1.39E-08	5.79	1.61	86.13	0.86	0.8
2016-01-25	389	-5.8	1	1.16E-08	10.83	3.01	91.00	0.91	0.8
2016-01-26	390	-7.8	3.6	4.17E-08	12.46	3.46	87.42	0.87	0.8
2016-01-27	391	-11.1	0	0.00E+00	16.04	4.46	80.29	0.80	0.5
2016-01-28	392	-10.5	10.8	1.25E-07	17.04	4.73	88.04	0.88	0.8
2016-01-29	393	-21.6	1.2	1.39E-08	13.54	3.76	73.58	0.74	0.8
2016-01-30	394	-11.8	7.4	8.56E-08	14.13	3.92	86.21	0.86	0.8
2016-01-31	395	-1.1	2.4	2.78E-08	14.29	3.97	91.58	0.92	0.8

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.14 : Moyennes journalières - Février 2016

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2016-02-01	396	-10.7	0	0.00E+00	11.71	3.25	79.38	0.79	0.5
2016-02-02	397	-12.4	0	0.00E+00	5.75	1.60	84.17	0.84	0.5
2016-02-03	398	-7.6	10	1.16E-07	15.83	4.40	89.04	0.89	0.8
2016-02-04	399	-15.1	0	0.00E+00	9.54	2.65	78.38	0.78	0.5
2016-02-05	400	-14.3	0	0.00E+00	8.63	2.40	78.92	0.79	0.5
2016-02-06	401	-14.1	2.6	3.01E-08	15.29	4.25	79.13	0.79	0.8
2016-02-07	402	-18.2	2.6	3.01E-08	15.38	4.27	75.29	0.75	0.8
2016-02-08	403	-8.1	7	8.10E-08	16.96	4.71	83.96	0.84	0.8
2016-02-09	404	-11.1	3.4	3.94E-08	10.67	2.96	82.46	0.82	0.8
2016-02-10	405	-20.0	1	1.16E-08	17.38	4.83	71.33	0.71	0.8
2016-02-11	406	-22.9	1.2	1.39E-08	12.00	3.33	68.26	0.68	0.8
2016-02-12	407	-27.4	0	0.00E+00	11.38	3.16	68.63	0.69	0.5
2016-02-13	408	-31.6	0	0.00E+00	7.88	2.19	62.88	0.63	0.5
2016-02-14	409	-26.6	0	0.00E+00	9.42	2.62	66.88	0.67	0.5
2016-02-15	410	-16.1	1.2	1.39E-08	16.63	4.62	71.04	0.71	0.8
2016-02-16	411	-8.0	1	1.16E-08	6.92	1.92	83.04	0.83	0.8
2016-02-17	412	-16.5	1	1.16E-08	13.71	3.81	73.21	0.73	0.8
2016-02-18	413	-15.4	0	0.00E+00	14.88	4.13	71.29	0.71	0.5
2016-02-19	414	-6.7	10.2	1.18E-07	20.16	5.60	82.14	0.82	0.8
2016-02-20	415	-2.8	2	2.31E-08	12.79	3.55	90.17	0.90	0.8
2016-02-21	416	-13.9	0	0.00E+00	13.08	3.63	68.29	0.68	0.5
2016-02-22	417	-18.9	0	0.00E+00	6.58	1.83	63.46	0.63	0.5
2016-02-23	418	-13.2	0	0.00E+00	10.54	2.93	67.42	0.67	0.5
2016-02-24	419	-4.7	0	0.00E+00	12.96	3.60	67.33	0.67	0.5
2016-02-25	420	-10.9	0	0.00E+00	28.88	8.02	69.79	0.70	0.5
2016-02-26	421	-15.7	0	0.00E+00	16.46	4.57	61.63	0.62	0.5
2016-02-27	422	-8.2	3.7	4.28E-08	26.38	7.33	74.75	0.75	0.8
2016-02-28	423	-17.7	4	4.63E-08	13.38	3.72	67.75	0.68	0.8
2016-02-29	424	-17.4	4.6	5.32E-08	14.42	4.00	75.75	0.76	0.8

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.15 : Moyennes journalières - Mars 2016

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2016-03-01	425	-19.8	0	0.00E+00	8.75	2.43	67.46	0.67	0.5
2016-03-02	426	-21.7	0	0.00E+00	13.79	3.83	64.71	0.65	0.5
2016-03-03	427	-21.8	0	0.00E+00	7.71	2.14	58.04	0.58	0.5
2016-03-04	428	-10.9	1	1.16E-08	7.71	2.14	72.79	0.73	0.8
2016-03-05	429	-10.1	0	0.00E+00	5.00	1.39	66.79	0.67	0.5
2016-03-06	430	-8.6	1	1.16E-08	17.67	4.91	73.08	0.73	0.8
2016-03-07	431	-2.2	7.4	8.56E-08	14.83	4.12	87.08	0.87	0.8
2016-03-08	432	-2.3	9.2	1.06E-07	13.26	3.68	89.04	0.89	0.8
2016-03-09	433	-0.3	5.2	6.02E-08	14.50	4.03	95.75	0.96	0.8
2016-03-10	434	-5.4	0	0.00E+00	7.17	1.99	80.50	0.81	0.5
2016-03-11	435	-3.9	0	0.00E+00	11.75	3.26	79.29	0.79	0.5
2016-03-12	436	4.5	0	0.00E+00	25.54	7.09	63.75	0.64	0.5
2016-03-13	437	-1.9	0	0.00E+00	10.71	2.97	57.71	0.58	0.5
2016-03-14	438	-0.1	11.2	1.30E-07	14.50	4.03	71.63	0.72	0.8
2016-03-15	439	2.2	4.6	5.32E-08	8.21	2.28	93.42	0.93	0.8
2016-03-16	440	0.6	1	1.16E-08	23.08	6.41	77.54	0.78	0.8
2016-03-17	441	-4.3	5.6	6.48E-08	13.29	3.69	87.21	0.87	0.8
2016-03-18	442	-10.4	0	0.00E+00	17.83	4.95	60.00	0.60	0.5
2016-03-19	443	-12.2	0	0.00E+00	8.71	2.42	62.54	0.63	0.5
2016-03-20	444	-6.7	0	0.00E+00	11.04	3.07	52.88	0.53	0.5
2016-03-21	445	-9.6	0	0.00E+00	10.92	3.03	65.42	0.65	0.5
2016-03-22	446	-8.6	0	0.00E+00	10.54	2.93	50.63	0.51	0.5
2016-03-23	447	-11.1	0	0.00E+00	7.63	2.12	52.00	0.52	0.5
2016-03-24	448	-9.0	4	4.63E-08	15.63	4.34	56.46	0.56	0.8
2016-03-25	449	-5.1	2.2	2.55E-08	12.63	3.51	72.75	0.73	0.8
2016-03-26	450	-0.9	0	0.00E+00	15.00	4.17	62.88	0.63	0.5
2016-03-27	451	1.8	0	0.00E+00	8.17	2.27	56.54	0.57	0.5
2016-03-28	452	-2.7	0	0.00E+00	20.42	5.67	65.00	0.65	0.5
2016-03-29	453	-2.8	0	0.00E+00	13.63	3.78	47.46	0.47	0.5
2016-03-30	454	2.6	3.4	3.94E-08	21.58	6.00	68.54	0.69	0.8
2016-03-31	455	-0.2	12.2	1.41E-07	12.79	3.55	95.00	0.95	0.8

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.16 : Moyennes journalières - Avril 2016

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2016-04-01	456	-5.6	3.1	3.59E-08	14.25	3.96	78.08	0.78	0.8
2016-04-02	457	-10.4	3.4	3.94E-08	16.50	4.58	70.58	0.71	0.8
2016-04-03	458	-15.1	0	0.00E+00	10.67	2.96	66.04	0.66	0.5
2016-04-04	459	-15.2	0	0.00E+00	9.25	2.57	56.63	0.57	0.5
2016-04-05	460	-10.4	0	0.00E+00	11.46	3.18	51.71	0.52	0.5
2016-04-06	461	-4.0	3.6	4.17E-08	11.46	3.18	77.13	0.77	0.8
2016-04-07	462	-7.9	11	1.27E-07	24.67	6.85	86.29	0.86	0.8
2016-04-08	463	-10.7	1	1.16E-08	22.04	6.12	58.29	0.58	0.8
2016-04-09	464	-13.2	0	0.00E+00	11.50	3.19	58.29	0.58	0.5
2016-04-10	465	-10.2	0	0.00E+00	10.79	3.00	51.08	0.51	0.5
2016-04-11	466	-1.2	3.4	3.94E-08	12.83	3.56	85.58	0.86	0.8
2016-04-12	467	-4.5	0	0.00E+00	16.46	4.57	75.17	0.75	0.5
2016-04-13	468	-3.7	0	0.00E+00	7.83	2.18	56.25	0.56	0.5
2016-04-14	469	2.2	0	0.00E+00	10.67	2.96	44.04	0.44	0.5
2016-04-15	470	6.6	0	0.00E+00	13.04	3.62	34.21	0.34	0.5
2016-04-16	471	9.7	0	0.00E+00	13.17	3.66	34.58	0.35	0.5
2016-04-17	472	5.8	0	0.00E+00	12.21	3.39	54.46	0.54	0.5
2016-04-18	473	1.7	8.8	1.02E-07	10.25	2.85	90.17	0.90	0.8
2016-04-19	474	4.2	0	0.00E+00	9.79	2.72	71.42	0.71	0.5
2016-04-20	475	6.6	0	0.00E+00	13.58	3.77	49.83	0.50	0.5
2016-04-21	476	6.9	9.4	1.09E-07	10.79	3.00	66.29	0.66	0.8
2016-04-22	477	-1.1	1	1.16E-08	17.54	4.87	69.67	0.70	0.8
2016-04-23	478	-2.5	0	0.00E+00	10.58	2.94	47.08	0.47	0.5
2016-04-24	479	-1.6	0	0.00E+00	13.17	3.66	47.25	0.47	0.5
2016-04-25	480	-2.5	0	0.00E+00	6.04	1.68	52.58	0.53	0.5
2016-04-26	481	-3.1	0	0.00E+00	14.96	4.16	49.42	0.49	0.5
2016-04-27	482	-4.2	0	0.00E+00	15.42	4.28	59.88	0.60	0.1
2016-04-28	483	1.1	0	0.00E+00	9.54	2.65	59.83	0.60	0.1
2016-04-29	484	3.9	0	0.00E+00	7.00	1.94	58.92	0.59	0.1
2016-04-30	485	6.1	0	0.00E+00	8.71	2.42	55.38	0.55	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)



Tableau A.17 : Moyennes journalières - Mai 2016

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2016-05-01	486	7.7	0	0.00E+00	10.54	2.93	48.83	0.49	0.1
2016-05-02	487	9.2	0	0.00E+00	4.79	1.33	48.54	0.49	0.1
2016-05-03	488	10.7	0	0.00E+00	13.58	3.77	46.04	0.46	0.1
2016-05-04	489	10.7	0	0.00E+00	10.71	2.97	54.13	0.54	0.1
2016-05-05	490	10.1	0	0.00E+00	6.04	1.68	59.08	0.59	0.1
2016-05-06	491	13.5	0	0.00E+00	9.38	2.60	51.04	0.51	0.1
2016-05-07	492	7.5	12.2	1.41E-07	15.38	4.27	73.71	0.74	0.1
2016-05-08	493	0.2	1.1	1.27E-08	14.50	4.03	66.67	0.67	0.1
2016-05-09	494	4.0	1.1	1.27E-08	14.96	4.16	56.96	0.57	0.1
2016-05-10	495	7.9	0	0.00E+00	6.54	1.82	44.67	0.45	0.1
2016-05-11	496	12.8	0	0.00E+00	5.17	1.44	42.79	0.43	0.1
2016-05-12	497	17.0	0	0.00E+00	10.04	2.79	42.71	0.43	0.1
2016-05-13	498	12.2	11	1.27E-07	13.00	3.61	83.04	0.83	0.1
2016-05-14	499	3.4	4.9	5.67E-08	14.25	3.96	78.21	0.78	0.1
2016-05-15	500	-0.8	1	1.16E-08	19.17	5.32	75.83	0.76	0.1
2016-05-16	501	2.6	2.3	2.66E-08	12.42	3.45	78.83	0.79	0.1
2016-05-17	502	4.9	0	0.00E+00	10.25	2.85	75.92	0.76	0.1
2016-05-18	503	9.8	0	0.00E+00	5.08	1.41	60.29	0.60	0.1
2016-05-19	504	14.6	0	0.00E+00	7.29	2.03	50.33	0.50	0.1
2016-05-20	505	16.1	0	0.00E+00	9.58	2.66	46.92	0.47	0.1
2016-05-21	506	11.0	1.2	1.39E-08	11.92	3.31	60.38	0.60	0.1
2016-05-22	507	10.9	0	0.00E+00	7.75	2.15	49.00	0.49	0.1
2016-05-23	508	17.9	0	0.00E+00	14.54	4.04	40.00	0.40	0.1
2016-05-24	509	17.9	0	0.00E+00	15.50	4.31	49.88	0.50	0.1
2016-05-25	510	11.5	0	0.00E+00	10.50	2.92	64.21	0.64	0.1
2016-05-26	511	14.9	3.8	4.40E-08	12.13	3.37	62.29	0.62	0.1
2016-05-27	512	16.9	1.8	2.08E-08	14.08	3.91	78.25	0.78	0.1
2016-05-28	513	13.2	17.8	2.06E-07	12.75	3.54	89.88	0.90	0.1
2016-05-29	514	19.8	6.4	7.41E-08	11.63	3.23	77.08	0.77	0.1
2016-05-30	515	16.7	0	0.00E+00	18.08	5.02	72.42	0.72	0.1
2016-05-31	516	10.0	0	0.00E+00	15.13	4.20	68.88	0.69	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.18 : Moyennes journalières - Juin 2016

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2016-06-01	517	13.1	0	0.00E+00	9.83	2.73	54.00	0.54	0.1
2016-06-02	518	18.4	6.6	7.64E-08	17.04	4.73	70.33	0.70	0.1
2016-06-03	519	13.6	0	0.00E+00	11.21	3.11	74.83	0.75	0.1
2016-06-04	520	15.2	0	0.00E+00	5.83	1.62	70.38	0.70	0.1
2016-06-05	521	13.5	17	1.97E-07	17.46	4.85	85.75	0.86	0.1
2016-06-06	522	13.3	1.2	1.39E-08	21.88	6.08	83.96	0.84	0.1
2016-06-07	523	6.9	4	4.63E-08	16.63	4.62	89.13	0.89	0.1
2016-06-08	524	4.0	4	4.63E-08	18.42	5.12	87.63	0.88	0.1
2016-06-09	525	7.8	0	0.00E+00	16.54	4.59	62.83	0.63	0.1
2016-06-10	526	10.5	0	0.00E+00	8.67	2.41	52.71	0.53	0.1
2016-06-11	527	12.1	10.8	1.25E-07	14.63	4.06	83.50	0.84	0.1
2016-06-12	528	6.7	7.5	8.68E-08	20.38	5.66	90.21	0.90	0.1
2016-06-13	529	9.1	0	0.00E+00	13.67	3.80	62.71	0.63	0.1
2016-06-14	530	13.4	0	0.00E+00	6.38	1.77	62.88	0.63	0.1
2016-06-15	531	17.5	0	0.00E+00	5.17	1.44	56.08	0.56	0.1
2016-06-16	532	21.0	0	0.00E+00	8.33	2.31	48.50	0.49	0.1
2016-06-17	533	20.0	0	0.00E+00	6.25	1.74	49.08	0.49	0.1
2016-06-18	534	21.7	0	0.00E+00	11.21	3.11	55.83	0.56	0.1
2016-06-19	535	24.0	0	0.00E+00	17.79	4.94	59.92	0.60	0.1
2016-06-20	536	19.5	0	0.00E+00	27.21	7.56	60.08	0.60	0.1
2016-06-21	537	13.2	1.5	1.74E-08	17.96	4.99	64.13	0.64	0.1
2016-06-22	538	11.9	0	0.00E+00	8.63	2.40	73.67	0.74	0.1
2016-06-23	539	14.0	0	0.00E+00	10.17	2.82	68.04	0.68	0.1
2016-06-24	540	18.1	0	0.00E+00	11.71	3.25	58.63	0.59	0.1
2016-06-25	541	22.1	0	0.00E+00	13.25	3.68	54.08	0.54	0.1
2016-06-26	542	19.8	26	3.01E-07	14.00	3.89	78.29	0.78	0.1
2016-06-27	543	16.3	0	0.00E+00	16.92	4.70	78.25	0.78	0.1
2016-06-28	544	12.9	0	0.00E+00	12.96	3.60	61.13	0.61	0.1
2016-06-29	545	15.6	0	0.00E+00	5.29	1.47	60.00	0.60	0.1
2016-06-30	546	18.4	0	0.00E+00	10.04	2.79	56.06	0.56	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.19 : Moyennes journalières - Juillet 2016

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2016-07-01	547	12.3	5	5.79E-08	9.21	2.56	92.96	0.93	0.1
2016-07-02	548	14.6	0	0.00E+00	14.08	3.91	68.33	0.68	0.1
2016-07-03	549	17.6	5.8	6.71E-08	9.17	2.55	79.50	0.80	0.1
2016-07-04	550	20.1	0	0.00E+00	13.42	3.73	65.46	0.65	0.1
2016-07-05	551	19.7	2.8	3.24E-08	9.33	2.59	72.71	0.73	0.1
2016-07-06	552	15.5	2.2	2.55E-08	8.63	2.40	87.21	0.87	0.1
2016-07-07	553	19.2	0	0.00E+00	8.92	2.48	76.42	0.76	0.1
2016-07-08	554	19.9	1.7	1.97E-08	7.71	2.14	79.58	0.80	0.1
2016-07-09	555	19.2	0	0.00E+00	11.75	3.26	75.38	0.75	0.1
2016-07-10	556	17.9	0	0.00E+00	8.75	2.43	61.83	0.62	0.1
2016-07-11	557	20.6	0	0.00E+00	8.67	2.41	62.75	0.63	0.1
2016-07-12	558	23.2	3	3.47E-08	17.13	4.76	66.13	0.66	0.1
2016-07-13	559	25.4	0	0.00E+00	18.17	5.05	66.92	0.67	0.1
2016-07-14	560	19.3	6.8	7.87E-08	14.29	3.97	85.38	0.85	0.1
2016-07-15	561	11.8	1	1.16E-08	13.46	3.74	75.79	0.76	0.1
2016-07-16	562	14.4	0	0.00E+00	6.21	1.72	65.25	0.65	0.1
2016-07-17	563	18.0	0	0.00E+00	16.04	4.46	64.08	0.64	0.1
2016-07-18	564	15.5	2.6	3.01E-08	14.38	3.99	78.83	0.79	0.1
2016-07-19	565	16.0	0	0.00E+00	11.29	3.14	66.00	0.66	0.1
2016-07-20	566	19.3	0	0.00E+00	12.71	3.53	65.29	0.65	0.1
2016-07-21	567	23.3	62.8	7.27E-07	14.57	4.05	81.00	0.81	0.1
2016-07-22	568	21.3	0	0.00E+00	10.04	2.79	81.67	0.82	0.1
2016-07-23	569	18.5	0	0.00E+00	9.75	2.71	79.50	0.80	0.1
2016-07-24	570	18.5	7	8.10E-08	11.13	3.09	81.46	0.81	0.1
2016-07-25	571	22.2	1.4	1.62E-08	13.29	3.69	83.92	0.84	0.1
2016-07-26	572	22.7	12.4	1.44E-07	11.33	3.15	77.25	0.77	0.1
2016-07-27	573	18.1	0	0.00E+00	11.04	3.07	76.58	0.77	0.1
2016-07-28	574	15.0	0	0.00E+00	8.13	2.26	81.29	0.81	0.1
2016-07-29	575	16.5	0	0.00E+00	6.79	1.89	75.29	0.75	0.1
2016-07-30	576	18.7	0	0.00E+00	5.54	1.54	67.38	0.67	0.1
2016-07-31	577	21.2	0	0.00E+00	5.08	1.41	64.75	0.65	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.20 : Moyennes journalières - Août 2016

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2016-08-01	578	22.7	0	0.00E+00	4.92	1.37	62.58	0.63	0.1
2016-08-02	579	23.4	0	0.00E+00	9.54	2.65	55.92	0.56	0.1
2016-08-03	580	24.2	0	0.00E+00	11.46	3.18	63.42	0.63	0.1
2016-08-04	581	21.5	0	0.00E+00	14.33	3.98	65.04	0.65	0.1
2016-08-05	582	21.7	0	0.00E+00	17.88	4.97	70.88	0.71	0.1
2016-08-06	583	18.2	1.1	1.27E-08	12.92	3.59	76.67	0.77	0.1
2016-08-07	584	18.4	1.8	2.08E-08	11.42	3.17	73.13	0.73	0.1
2016-08-08	585	18.4	0	0.00E+00	8.38	2.33	72.96	0.73	0.1
2016-08-09	586	21.5	0	0.00E+00	15.13	4.20	57.04	0.57	0.1
2016-08-10	587	18.1	0	0.00E+00	10.79	3.00	67.08	0.67	0.1
2016-08-11	588	17.3	2.2	2.55E-08	4.71	1.31	72.58	0.73	0.1
2016-08-12	589	16.2	0	0.00E+00	10.50	2.92	71.92	0.72	0.1
2016-08-13	590	15.0	19.4	2.25E-07	11.25	3.13	76.25	0.76	0.1
2016-08-14	591	19.1	0	0.00E+00	7.79	2.16	73.96	0.74	0.1
2016-08-15	592	20.7	0	0.00E+00	10.58	2.94	70.54	0.71	0.1
2016-08-16	593	19.3	0	0.00E+00	7.46	2.07	84.04	0.84	0.1
2016-08-17	594	20.5	0	0.00E+00	11.21	3.11	82.21	0.82	0.1
2016-08-18	595	19.1	0	0.00E+00	6.83	1.90	74.96	0.75	0.1
2016-08-19	596	21.8	1.5	1.74E-08	12.21	3.39	75.79	0.76	0.1
2016-08-20	597	22.3	10.7	1.24E-07	12.04	3.34	81.88	0.82	0.1
2016-08-21	598	16.1	12.6	1.46E-07	20.83	5.79	87.17	0.87	0.1
2016-08-22	599	15.5	0	0.00E+00	11.42	3.17	74.75	0.75	0.1
2016-08-23	600	18.8	8.2	9.49E-08	17.04	4.73	79.92	0.80	0.1
2016-08-24	601	20.1	8	9.26E-08	16.75	4.65	82.71	0.83	0.1
2016-08-25	602	19.9	0	0.00E+00	10.21	2.84	87.33	0.87	0.1
2016-08-26	603	14.4	0	0.00E+00	11.00	3.06	82.17	0.82	0.1
2016-08-27	604	15.3	0	0.00E+00	6.63	1.84	82.54	0.83	0.1
2016-08-28	605	16.7	18.5	2.14E-07	12.00	3.33	91.75	0.92	0.1
2016-08-29	606	16.9	0	0.00E+00	6.17	1.71	77.79	0.78	0.1
2016-08-30	607	19.6	1.2	1.39E-08	10.63	2.95	81.92	0.82	0.1
2016-08-31	608	15.2	0	0.00E+00	10.50	2.92	79.58	0.80	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.21 : Moyennes journalières - Septembre 2016

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2016-09-01	609	12.2	0	0.00E+00	16.92	4.70	74.29	0.74	0.1
2016-09-02	610	10.5	0	0.00E+00	6.92	1.92	79.88	0.80	0.1
2016-09-03	611	16.2	0	0.00E+00	9.96	2.77	73.38	0.73	0.1
2016-09-04	612	18.3	0	0.00E+00	12.38	3.44	71.08	0.71	0.1
2016-09-05	613	18.5	0	0.00E+00	15.21	4.22	72.21	0.72	0.1
2016-09-06	614	17.0	0	0.00E+00	13.13	3.65	76.96	0.77	0.1
2016-09-07	615	16.9	0	0.00E+00	9.08	2.52	89.25	0.89	0.1
2016-09-08	616	14.7	6.9	7.99E-08	13.58	3.77	88.54	0.89	0.1
2016-09-09	617	18.7	0	0.00E+00	12.42	3.45	77.04	0.77	0.1
2016-09-10	618	15.4	6.4	7.41E-08	11.08	3.08	83.00	0.83	0.1
2016-09-11	619	12.4	4.8	5.56E-08	17.71	4.92	81.25	0.81	0.1
2016-09-12	620	17.0	1.2	1.39E-08	21.71	6.03	75.30	0.75	0.1
2016-09-13	621	12.0	30.8	3.56E-07	17.04	4.73	91.04	0.91	0.1
2016-09-14	622	9.0	0	0.00E+00	10.17	2.82	82.38	0.82	0.1
2016-09-15	623	12.1	0	0.00E+00	9.79	2.72	80.54	0.81	0.1
2016-09-16	624	15.3	0	0.00E+00	13.33	3.70	76.46	0.76	0.1
2016-09-17	625	15.7	15.2	1.76E-07	9.63	2.67	93.75	0.94	0.1
2016-09-18	626	17.4	0	0.00E+00	6.08	1.69	92.63	0.93	0.1
2016-09-19	627	18.0	0	0.00E+00	13.17	3.66	86.04	0.86	0.1
2016-09-20	628	16.5	1	1.16E-08	19.96	5.54	70.04	0.70	0.1
2016-09-21	629	14.3	0	0.00E+00	12.17	3.38	71.29	0.71	0.1
2016-09-22	630	8.8	1.8	2.08E-08	7.96	2.21	89.50	0.90	0.1
2016-09-23	631	9.3	0	0.00E+00	6.33	1.76	79.75	0.80	0.1
2016-09-24	632	6.8	0	0.00E+00	6.08	1.69	75.21	0.75	0.1
2016-09-25	633	7.6	0	0.00E+00	5.71	1.59	71.83	0.72	0.1
2016-09-26	634	9.1	5	5.79E-08	17.63	4.90	81.46	0.81	0.1
2016-09-27	635	12.3	1	1.16E-08	14.04	3.90	84.83	0.85	0.1
2016-09-28	636	13.5	0	0.00E+00	12.54	3.48	71.46	0.71	0.1
2016-09-29	637	16.5	0	0.00E+00	6.33	1.76	79.42	0.79	0.1
2016-09-30	638	12.7	0	0.00E+00	8.38	2.33	75.08	0.75	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.22 : Moyennes journalières - Octobre 2016

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2016-10-01	639	12.7	0	0.00E+00	9.08	2.52	68.54	0.69	0.1
2016-10-02	640	11.6	2.4	2.78E-08	5.38	1.49	88.92	0.89	0.1
2016-10-03	641	8.1		0.00E+00	7.42	2.06	92.08	0.92	0.1
2016-10-04	642	12.2	0	0.00E+00	7.58	2.11	90.50	0.91	0.1
2016-10-05	643	12.4		0.00E+00	12.92	3.59	87.83	0.88	0.1
2016-10-06	644	17.5	0	0.00E+00	14.33	3.98	73.79	0.74	0.1
2016-10-07	645	16.6	8.1	9.38E-08	13.79	3.83	85.71	0.86	0.1
2016-10-08	646	6.6	0	0.00E+00	16.46	4.57	78.54	0.79	0.1
2016-10-09	647	1.0	0	0.00E+00	11.42	3.17	72.50	0.73	0.1
2016-10-10	648	3.9	1	1.16E-08	11.08	3.08	72.17	0.72	0.1
2016-10-11	649	11.1	0	0.00E+00	15.04	4.18	80.63	0.81	0.1
2016-10-12	650	11.7	18.6	2.15E-07	19.83	5.51	67.50	0.68	0.1
2016-10-13	651	2.5	3	3.47E-08	13.88	3.85	82.63	0.83	0.1
2016-10-14	652	5.1	0	0.00E+00	10.33	2.87	80.29	0.80	0.1
2016-10-15	653	10.9	1	1.16E-08	25.00	6.94	74.42	0.74	0.1
2016-10-16	654	9.2	3.8	4.40E-08	18.58	5.16	79.50	0.80	0.1
2016-10-17	655	3.5	1.2	1.39E-08	12.54	3.48	85.54	0.86	0.1
2016-10-18	656	11.5	19.6	2.27E-07	20.58	5.72	90.21	0.90	0.1
2016-10-19	657	9.5	3	3.47E-08	10.67	2.96	84.00	0.84	0.1
2016-10-20	658	6.1	0	0.00E+00	7.33	2.04	83.08	0.83	0.1
2016-10-21	659	2.3	0	0.00E+00	13.00	3.61	76.75	0.77	0.1
2016-10-22	660	1.7	0	0.00E+00	18.67	5.19	82.63	0.83	0.1
2016-10-23	661	1.8	1	1.16E-08	22.17	6.16	77.21	0.77	0.1
2016-10-24	662	0.2	0	0.00E+00	21.08	5.86	78.50	0.79	0.1
2016-10-25	663	0.0	1	1.16E-08	17.42	4.84	74.58	0.75	0.1
2016-10-26	664	-3.3	0	0.00E+00	11.33	3.15	67.71	0.68	0.1
2016-10-27	665	-2.3	0	0.00E+00	12.13	3.37	76.17	0.76	0.1
2016-10-28	666	-1.6	3.4	3.94E-08	9.21	2.56	72.92	0.73	0.1
2016-10-29	667	2.7	5.4	6.25E-08	11.92	3.31	95.42	0.95	0.1
2016-10-30	668	1.0	1	1.16E-08	9.54	2.65	87.17	0.87	0.1
2016-10-31	669	2.6	0	0.00E+00	11.88	3.30	74.08	0.74	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.23 : Moyennes journalières - Novembre 2016

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2016-11-01	670	4.7	4.2	4.86E-08	18.13	5.03	92.08	0.92	0.1
2016-11-02	671	7.2	0	0.00E+00	8.17	2.27	85.75	0.86	0.1
2016-11-03	672	1.4	0	0.00E+00	9.88	2.74	89.17	0.89	0.1
2016-11-04	673	1.4	0	0.00E+00	12.96	3.60	74.92	0.75	0.1
2016-11-05	674	3.5	0	0.00E+00	14.46	4.02	78.04	0.78	0.1
2016-11-06	675	3.8	0	0.00E+00	9.08	2.52	78.71	0.79	0.1
2016-11-07	676	9.7	1.2	1.39E-08	16.46	4.57	86.33	0.86	0.1
2016-11-08	677	4.6	2.4	2.78E-08	15.04	4.18	90.54	0.91	0.1
2016-11-09	678	-0.2	0	0.00E+00	11.88	3.30	79.96	0.80	0.1
2016-11-10	679	5.4	2.8	3.24E-08	19.17	5.32	80.67	0.81	0.1
2016-11-11	680	-0.9	0	0.00E+00	24.46	6.79	70.96	0.71	0.1
2016-11-12	681	2.6	1	1.16E-08	23.13	6.42	59.29	0.59	0.1
2016-11-13	682	7.1	0	0.00E+00	18.08	5.02	66.54	0.67	0.1
2016-11-14	683	3.8	0	0.00E+00	10.08	2.80	85.50	0.86	0.1
2016-11-15	684	3.7	0	0.00E+00	11.25	3.13	88.75	0.89	0.1
2016-11-16	685	4.8	0	0.00E+00	7.75	2.15	91.50	0.92	0.1
2016-11-17	686	3.6	0	0.00E+00	8.71	2.42	79.96	0.80	0.1
2016-11-18	687	5.8	0	0.00E+00	11.13	3.09	79.13	0.79	0.1
2016-11-19	688	3.8	10.2	1.18E-07	17.79	4.94	87.46	0.87	0.1
2016-11-20	689	-4.9	8.2	9.49E-08	29.63	8.23	86.42	0.86	0.8
2016-11-21	690	-5.1	15	1.74E-07	28.50	7.92	87.29	0.87	0.8
2016-11-22	691	-4.7	1	1.16E-08	21.63	6.01	84.63	0.85	0.8
2016-11-23	692	-5.3	0	0.00E+00	8.21	2.28	86.88	0.87	0.5
2016-11-24	693	-4.4	3.4	3.94E-08	9.08	2.52	90.42	0.90	0.8
2016-11-25	694	-2.5	4.6	5.32E-08	4.75	1.32	93.58	0.94	0.8
2016-11-26	695	-3.7	1	1.16E-08	6.71	1.86	91.50	0.92	0.8
2016-11-27	696	-3.8	1	1.16E-08	5.17	1.44	88.92	0.89	0.8
2016-11-28	697	-3.3	0	0.00E+00	13.58	3.77	90.58	0.91	0.5
2016-11-29	698	-1.0	7.8	9.03E-08	17.67	4.91	93.17	0.93	0.8
2016-11-30	699	1.6	5.2	6.02E-08	11.42	3.17	97.54	0.98	0.8

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.24 : Moyennes journalières - Décembre 2016

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2016-12-01	700	0.6	2	2.31E-08	12.50	3.47	95.08	0.95	0.8
2016-12-02	701	-2.0	1.2	1.39E-08	15.21	4.22	90.58	0.91	0.8
2016-12-03	702	-4.2	0	0.00E+00	14.42	4.00	83.29	0.83	0.5
2016-12-04	703	-6.1	1.2	1.39E-08	9.00	2.50	83.25	0.83	0.8
2016-12-05	704	-4.6	5	5.79E-08	8.96	2.49	89.04	0.89	0.8
2016-12-06	705	-0.7	0	0.00E+00	7.33	2.04	91.29	0.91	0.5
2016-12-07	706	-2.7	4.8	5.56E-08	18.75	5.21	84.50	0.85	0.8
2016-12-08	707	-6.2	1.2	1.39E-08	17.33	4.81	82.63	0.83	0.8
2016-12-09	708	-9.1	0	0.00E+00	16.75	4.65	76.08	0.76	0.5
2016-12-10	709	-11.7	1	1.16E-08	5.96	1.66	79.17	0.79	0.8
2016-12-11	710	-13.6	0	0.00E+00	8.08	2.25	79.29	0.79	0.5
2016-12-12	711	-9.6	1.2	1.39E-08	10.38	2.88	83.29	0.83	0.8
2016-12-13	712	-9.9	2.4	2.78E-08	15.38	4.27	84.38	0.84	0.8
2016-12-14	713	-18.1	1.2	1.39E-08	12.26	3.41	81.67	0.82	0.8
2016-12-15	714	-25.7	0	0.00E+00	12.71	3.53	67.71	0.68	0.5
2016-12-16	715	-21.6	0	0.00E+00	8.17	2.27	77.88	0.78	0.5
2016-12-17	716	-15.8	3.8	4.40E-08	10.63	2.95	83.00	0.83	0.8
2016-12-18	717	-23.8	0	0.00E+00	14.92	4.14	71.42	0.71	0.5
2016-12-19	718	-16.5	1.3	1.50E-08	18.88	5.24	77.04	0.77	0.8
2016-12-20	719	-4.8	6.3	7.29E-08	22.54	6.26	85.17	0.85	0.8
2016-12-21	720	-4.8	1	1.16E-08	14.13	3.92	85.79	0.86	0.8
2016-12-22	721	-4.3	0	0.00E+00	11.71	3.25	88.29	0.88	0.5
2016-12-23	722	-1.0	0	0.00E+00	20.08	5.58	81.29	0.81	0.5
2016-12-24	723	-5.5	4.6	5.32E-08	19.08	5.30	87.63	0.88	0.8
2016-12-25	724	-14.3	0	0.00E+00	9.96	2.77	76.88	0.77	0.5
2016-12-26	725	-6.9	10.5	1.22E-07	18.25	5.07	86.13	0.86	0.8
2016-12-27	726	-5.7	1.4	1.62E-08	19.29	5.36	80.50	0.81	0.8
2016-12-28	727	-11.8	0	0.00E+00	9.71	2.70	76.92	0.77	0.5
2016-12-29	728	-7.4	11.8	1.37E-07	14.42	4.00	87.54	0.88	0.8
2016-12-30	729	-14.9	1	1.16E-08	17.17	4.77	76.79	0.77	0.8
2016-12-31	730	-20.0	0	0.00E+00	9.96	2.77	79.25	0.79	0.5

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)



Tableau A.25 : Moyennes journalières - Janvier 2017

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2017-01-01	731	-10.3	2.1	2.43E-08	10.96	3.04	84.17	0.84	0.8
2017-01-02	732	-8.5	0	0.00E+00	10.13	2.81	81.79	0.82	0.5
2017-01-03	733	-6.9	2.6	3.01E-08	14.67	4.07	87.25	0.87	0.8
2017-01-04	734	-13.0	11	1.27E-07	14.38	3.99	84.67	0.85	0.8
2017-01-05	735	-20.3	1.8	2.08E-08	18.04	5.01	72.17	0.72	0.8
2017-01-06	736	-22.4	0	0.00E+00	5.71	1.59	76.71	0.77	0.5
2017-01-07	737	-22.1	1	1.16E-08	6.00	1.67	77.57	0.78	0.8
2017-01-08	738	-23.8	0	0.00E+00	8.26	2.29	76.50	0.77	0.5
2017-01-09	739	-15.8	4.8	5.56E-08	12.75	3.54	82.25	0.82	0.8
2017-01-10	740	-7.3	6.8	7.87E-08	17.63	4.90	87.13	0.87	0.8
2017-01-11	741	-4.2	8.7	1.01E-07	27.83	7.73	87.29	0.87	0.8
2017-01-12	742	-13.3	0	0.00E+00	9.79	2.72	78.75	0.79	0.5
2017-01-13	743	-19.0	1	1.16E-08	15.63	4.34	69.04	0.69	0.8
2017-01-14	744	-16.2	1.2	1.39E-08	16.25	4.51	79.33	0.79	0.8
2017-01-15	745	-14.0	0	0.00E+00	12.29	3.41	76.50	0.77	0.5
2017-01-16	746	-2.9	0	0.00E+00	17.88	4.97	80.04	0.80	0.5
2017-01-17	747	-2.9	0	0.00E+00	11.63	3.23	87.29	0.87	0.5
2017-01-18	748	-2.8	0	0.00E+00	11.75	3.26	91.58	0.92	0.5
2017-01-19	749	0.0	1.2	1.39E-08	9.83	2.73	88.38	0.88	0.8
2017-01-20	750	-0.3	0	0.00E+00	16.08	4.47	91.58	0.92	0.5
2017-01-21	751	-0.6	0	0.00E+00	7.13	1.98	91.04	0.91	0.5
2017-01-22	752	-0.3	0	0.00E+00	16.46	4.57	88.63	0.89	0.5
2017-01-23	753	-1.4	0	0.00E+00	15.42	4.28	83.13	0.83	0.5
2017-01-24	754	-4.3	0	0.00E+00	10.46	2.91	74.75	0.75	0.5
2017-01-25	755	-4.0	3.4	3.94E-08	8.33	2.31	90.67	0.91	0.8
2017-01-26	756	-5.4	0	0.00E+00	17.21	4.78	85.13	0.85	0.5
2017-01-27	757	-6.9	6.1	7.06E-08	17.29	4.80	81.46	0.81	0.8
2017-01-28	758	-9.5	0	0.00E+00	10.67	2.96	82.54	0.83	0.5
2017-01-29	759	-15.4	1	1.16E-08	8.00	2.22	78.46	0.78	0.8
2017-01-30	760	-17.6	0	0.00E+00	6.42	1.78	77.63	0.78	0.5
2017-01-31	761	-14.7	0	0.00E+00	8.46	2.35	75.00	0.75	0.5

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.26 : Moyennes journalières - Février 2017

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2017-02-01	762	-13.9	2.4	2.78E-08	11.46	3.18	79.54	0.80	0.8
2017-02-02	763	-19.5	1.2	1.39E-08	8.96	2.49	75.92	0.76	0.8
2017-02-03	764	-18.2	0	0.00E+00	10.75	2.99	70.04	0.70	0.5
2017-02-04	765	-13.8	1	1.16E-08	12.75	3.54	75.42	0.75	0.8
2017-02-05	766	-10.1	5	5.79E-08	15.54	4.32	81.54	0.82	0.8
2017-02-06	767	-17.0	0	0.00E+00	12.00	3.33	75.58	0.76	0.5
2017-02-07	768	-17.9	9	1.04E-07	17.08	4.75	76.71	0.77	0.8
2017-02-08	769	-19.4	3.8	4.40E-08	15.00	4.17	73.42	0.73	0.8
2017-02-09	770	-21.1	1.2	1.39E-08	9.75	2.71	73.39	0.73	0.8
2017-02-10	771	-21.5	4.4	5.09E-08	11.38	3.16	72.17	0.72	0.8
2017-02-11	772	-10.9	1	1.16E-08	7.42	2.06	78.13	0.78	0.8
2017-02-12	773	-11.9	4.4	5.09E-08	7.71	2.14	86.75	0.87	0.8
2017-02-13	774	-10.9	0	0.00E+00	12.79	3.55	79.63	0.80	0.5
2017-02-14	775	-7.4	4.8	5.56E-08	13.38	3.72	87.25	0.87	0.8
2017-02-15	776	-10.3	2.2	2.55E-08	15.75	4.38	83.67	0.84	0.8
2017-02-16	777	-12.0	0	0.00E+00	12.83	3.56	78.04	0.78	0.5
2017-02-17	778	-11.5	0	0.00E+00	8.79	2.44	76.54	0.77	0.5
2017-02-18	779	-0.6	1	1.16E-08	15.46	4.29	81.83	0.82	0.8
2017-02-19	780	-3.6	0	0.00E+00	12.79	3.55	81.29	0.81	0.5
2017-02-20	781	-8.0	0	0.00E+00	9.04	2.51	58.79	0.59	0.5
2017-02-21	782	-0.8	1.5	1.74E-08	19.54	5.43	66.88	0.67	0.8
2017-02-22	783	2.5	6.7	7.75E-08	11.92	3.31	96.54	0.97	0.5
2017-02-23	784	-0.9	2.8	3.24E-08	11.04	3.07	93.00	0.93	0.8
2017-02-24	785	-6.7	0	0.00E+00	13.50	3.75	86.42	0.86	0.5
2017-02-25	786	-4.3	5	5.79E-08	20.88	5.80	85.29	0.85	0.8
2017-02-26	787	-7.9	2.4	2.78E-08	20.58	5.72	71.92	0.72	0.8
2017-02-27	788	-7.5	0	0.00E+00	16.79	4.66	67.17	0.67	0.5
2017-02-28	789	-2.5	4	4.63E-08	13.75	3.82	74.17	0.74	0.8

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.27 : Moyennes journalières - Mars 2017

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2017-03-01	790	-12.1	1.2	1.39E-08	23.88	6.63	80.63	0.81	0.8
2017-03-02	791	-18.3	0	0.00E+00	17.92	4.98	65.71	0.66	0.5
2017-03-03	792	-20.9	1	1.16E-08	12.17	3.38	67.57	0.68	0.8
2017-03-04	793	-21.8	0	0.00E+00	2.67	0.74	71.31	0.71	0.5
2017-03-05	794	-16.2	8.3	9.61E-08	12.79	3.55	59.79	0.60	0.8
2017-03-06	795	-4.8	7.4	8.56E-08	15.92	4.42	80.50	0.81	0.8
2017-03-07	796	3.4	14.7	1.70E-07	22.92	6.37	89.96	0.90	0.5
2017-03-08	797	-2.9	2.4	2.78E-08	24.67	6.85	72.21	0.72	0.8
2017-03-09	798	-13.2	0	0.00E+00	17.92	4.98	57.33	0.57	0.5
2017-03-10	799	-21.5	0	0.00E+00	12.46	3.46	66.00	0.66	0.5
2017-03-11	800	-21.5	0	0.00E+00	14.96	4.16	63.71	0.64	0.5
2017-03-12	801	-19.6	1	1.16E-08	11.04	3.07	56.50	0.57	0.8
2017-03-13	802	-19.1	0	0.00E+00	4.67	1.30	50.21	0.50	0.5
2017-03-14	803	-15.5	0	0.00E+00	13.79	3.83	50.08	0.50	0.5
2017-03-15	804	-12.2	0	0.00E+00	24.50	6.81	51.29	0.51	0.5
2017-03-16	805	-9.9	0	0.00E+00	14.67	4.07	56.88	0.57	0.5
2017-03-17	806	-7.8	1.2	1.39E-08	5.04	1.40	50.83	0.51	0.8
2017-03-18	807	-2.8	0	0.00E+00	7.63	2.12	38.50	0.39	0.5
2017-03-19	808	-0.7	0	0.00E+00	5.63	1.56	47.63	0.48	0.5
2017-03-20	809	0.6	1.2	1.39E-08	14.92	4.14	79.88	0.80	0.5
2017-03-21	810	-9.6	0	0.00E+00	17.92	4.98	76.92	0.77	0.5
2017-03-22	811	-13.7	0	0.00E+00	13.04	3.62	53.33	0.53	0.5
2017-03-23	812	-8.8	1.1	1.27E-08	12.46	3.46	51.13	0.51	0.8
2017-03-24	813	-6.2	3.4	3.94E-08	16.13	4.48	85.46	0.85	0.8
2017-03-25	814	-10.0	0	0.00E+00	8.92	2.48	55.92	0.56	0.5
2017-03-26	815	-3.9	4.5	5.21E-08	17.42	4.84	56.50	0.57	0.8
2017-03-27	816	0.5	16.9	1.96E-07	7.29	2.03	94.63	0.95	0.5
2017-03-28	817	1.1	0	0.00E+00	12.08	3.36	75.38	0.75	0.5
2017-03-29	818	-1.4	0	0.00E+00	11.46	3.18	73.92	0.74	0.5
2017-03-30	819	-1.2	0	0.00E+00	9.58	2.66	62.54	0.63	0.5
2017-03-31	820	1.1	0	0.00E+00	13.29	3.69	51.04	0.51	0.5

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.28 : Moyennes journalières - Avril 2017

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2017-04-01	821	2.5	0	0.00E+00	7.46	2.07	63.04	0.63	0.5
2017-04-02	822	1.0	0	0.00E+00	8.08	2.25	68.25	0.68	0.5
2017-04-03	823	3.8	0	0.00E+00	11.67	3.24	51.25	0.51	0.5
2017-04-04	824	3.2	7.2	8.33E-08	13.29	3.69	85.63	0.86	0.5
2017-04-05	825	3.2	1	1.16E-08	13.25	3.68	71.08	0.71	0.5
2017-04-06	826	0.4	0	0.00E+00	20.92	5.81	71.13	0.71	0.5
2017-04-07	827	-2.5	0	0.00E+00	26.92	7.48	74.50	0.75	0.5
2017-04-08	828	2.1	1	1.16E-08	10.50	2.92	51.54	0.52	0.5
2017-04-09	829	6.6	5	5.79E-08	14.38	3.99	60.17	0.60	0.5
2017-04-10	830	0.3	14.8	1.71E-07	13.67	3.80	93.04	0.93	0.5
2017-04-11	831	-2.5	1.4	1.62E-08	15.92	4.42	76.67	0.77	0.8
2017-04-12	832	1.7	1	1.16E-08	9.13	2.53	82.71	0.83	0.5
2017-04-13	833	3.0	1.2	1.39E-08	5.38	1.49	52.08	0.52	0.5
2017-04-14	834	6.5	0	0.00E+00	8.17	2.27	51.83	0.52	0.5
2017-04-15	835	7.9	0	0.00E+00	15.00	4.17	56.63	0.57	0.5
2017-04-16	836	0.8	3.8	4.40E-08	13.75	3.82	88.79	0.89	0.5
2017-04-17	837	-2.9	4.8	5.56E-08	13.88	3.85	59.21	0.59	0.8
2017-04-18	838	-2.5	6.4	7.41E-08	10.42	2.89	48.04	0.48	0.8
2017-04-19	839	2.5	10.6	1.23E-07	15.54	4.32	83.17	0.83	0.5
2017-04-20	840	2.1	0	0.00E+00	16.79	4.66	71.88	0.72	0.5
2017-04-21	841	1.9	9.8	1.13E-07	16.08	4.47	92.13	0.92	0.5
2017-04-22	842	5.5	0	0.00E+00	10.96	3.04	69.92	0.70	0.5
2017-04-23	843	-0.6	2.6	3.01E-08	14.67	4.07	68.75	0.69	0.8
2017-04-24	844	-3.8	0	0.00E+00	8.63	2.40	56.17	0.56	0.5
2017-04-25	845	8.7	0	0.00E+00	20.25	5.63	52.38	0.52	0.5
2017-04-26	846	5.3	3.5	4.05E-08	13.08	3.63	97.71	0.98	0.5
2017-04-27	847	17.2	12.1	1.40E-07	19.92	5.53	80.88	0.81	0.1
2017-04-28	848	7.2	1	1.16E-08	27.21	7.56	74.04	0.74	0.1
2017-04-29	849	-0.6	0	0.00E+00	22.33	6.20	62.38	0.62	0.1
2017-04-30	850	1.6	0	0.00E+00	10.33	2.87	60.00	0.60	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.29 : Moyennes journalières - Mai 2017

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2017-05-01	851	3.9	28.2	3.26E-07	18.92	5.25	83.25	0.83	0.1
2017-05-02	852	3.1	2	2.31E-08	18.79	5.22	91.88	0.92	0.1
2017-05-03	853	3.5	0	0.00E+00	14.46	4.02	57.83	0.58	0.1
2017-05-04	854	8.6	1	1.16E-08	15.88	4.41	52.25	0.52	0.1
2017-05-05	855	6.5	1.4	1.62E-08	14.21	3.95	81.42	0.81	0.1
2017-05-06	856	1.5	5.6	6.48E-08	21.21	5.89	91.67	0.92	0.1
2017-05-07	857	-1.7	3.2	3.70E-08	24.38	6.77	82.43	0.82	0.8
2017-05-08	858	-3.2	2.2	2.55E-08	17.21	4.78	77.67	0.78	0.8
2017-05-09	859	-0.7	2	2.31E-08	6.25	1.74	83.17	0.83	0.5
2017-05-10	860	6.3	0	0.00E+00	7.92	2.20	64.58	0.65	0.1
2017-05-11	861	8.8	0	0.00E+00	8.83	2.45	63.38	0.63	0.1
2017-05-12	862	12.5	0	0.00E+00	10.88	3.02	62.96	0.63	0.1
2017-05-13	863	10.8	6	6.94E-08	7.63	2.12	87.13	0.87	0.1
2017-05-14	864	6.6	0	0.00E+00	14.67	4.07	92.75	0.93	0.1
2017-05-15	865	10.0	0	0.00E+00	11.13	3.09	79.83	0.80	0.1
2017-05-16	866	13.1	0	0.00E+00	12.00	3.33	65.33	0.65	0.1
2017-05-17	867	17.8	5	5.79E-08	12.08	3.36	81.43	0.81	0.1
2017-05-18	868	5.6	15	1.74E-07	18.79	5.22	94.33	0.94	0.1
2017-05-19	869	0.4	1	1.16E-08	14.58	4.05	82.08	0.82	0.1
2017-05-20	870	6.1	0	0.00E+00	8.08	2.25	58.92	0.59	0.1
2017-05-21	871	10.5	1.2	1.39E-08	19.25	5.35	56.04	0.56	0.1
2017-05-22	872	10.4	10.2	1.18E-07	18.33	5.09	90.58	0.91	0.1
2017-05-23	873	10.9	0	0.00E+00	13.83	3.84	82.38	0.82	0.1
2017-05-24	874	12.3	0	0.00E+00	6.42	1.78	75.71	0.76	0.1
2017-05-25	875	14.8	4.2	4.86E-08	11.00	3.06	78.67	0.79	0.1
2017-05-26	876	16.1	1	1.16E-08	9.83	2.73	73.13	0.73	0.1
2017-05-27	877	18.0	0	0.00E+00	7.54	2.09	72.21	0.72	0.1
2017-05-28	878	18.8	0	0.00E+00	13.25	3.68	66.25	0.66	0.1
2017-05-29	879	16.0	6.6	7.64E-08	12.33	3.43	84.42	0.84	0.1
2017-05-30	880	13.9	4.8	5.56E-08	15.25	4.24	81.71	0.82	0.1
2017-05-31	881	12.0	4.6	5.32E-08	13.83	3.84	86.92	0.87	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.30 : Moyennes journalières - Juin 2017

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2017-06-01	882	6.1	4.4	5.09E-08	13.88	3.85	90.42	0.90	0.1
2017-06-02	883	7.8	1.1	1.27E-08	14.13	3.92	82.29	0.82	0.1
2017-06-03	884	11.8	0	0.00E+00	8.50	2.36	66.96	0.67	0.1
2017-06-04	885	15.8	0	0.00E+00	7.25	2.01	61.08	0.61	0.1
2017-06-05	886	16.0	6.5	7.52E-08	10.50	2.92	79.92	0.80	0.1
2017-06-06	887	16.6	0	0.00E+00	14.33	3.98	61.38	0.61	0.1
2017-06-07	888	19.1	0	0.00E+00	6.33	1.76	57.43	0.57	0.1
2017-06-08	889	20.2	0	0.00E+00	18.04	5.01	49.17	0.49	0.1
2017-06-09	890	11.7	0	0.00E+00	13.46	3.74	65.79	0.66	0.1
2017-06-10	891	14.3	1.4	1.62E-08	14.71	4.09	72.67	0.73	0.1
2017-06-11	892	18.5	0	0.00E+00	21.00	5.83	51.29	0.51	0.1
2017-06-12	893	21.2	0	0.00E+00	15.59	4.33	67.41	0.67	0.1
2017-06-13	894	13.7	0	0.00E+00	21.65	6.01	42.12	0.42	0.1
2017-06-14	895	10.9	0	0.00E+00	10.71	2.98	48.35	0.48	0.1
2017-06-15	896	15.1	0	0.00E+00	17.24	4.79	54.53	0.55	0.1
2017-06-16	897	18.7	0	0.00E+00	15.89	4.41	66.88	0.67	0.1
2017-06-17	898	17.6	9.4	1.09E-07	14.48	4.02	74.71	0.75	0.1
2017-06-18	899	18.7	7.8	9.03E-08	9.77	2.71	94.59	0.95	0.1
2017-06-19	900	14.5	2.8	3.24E-08	17.12	4.76	86.82	0.87	0.1
2017-06-20	901	14.7	18.8	2.18E-07	11.65	3.24	85.00	0.85	0.1
2017-06-21	902	15.6	0	0.00E+00	13.88	3.86	54.76	0.55	0.1
2017-06-22	903	14.5	0	0.00E+00	14.24	3.96	78.88	0.79	0.1
2017-06-23	904	18.1	0	0.00E+00	9.41	2.61	85.71	0.86	0.1
2017-06-24	905	15.1	0	0.00E+00	13.47	3.74	67.18	0.67	0.1
2017-06-25	906	12.0	0	0.00E+00	17.00	4.72	49.12	0.49	0.1
2017-06-26	907	12.3	0	0.00E+00	7.82	2.17	45.53	0.46	0.1
2017-06-27	908	14.3	2.2	2.55E-08	8.06	2.24	65.41	0.65	0.1
2017-06-28	909	15.2	9.2	1.06E-07	12.94	3.59	75.35	0.75	0.1
2017-06-29	910	14.3	1.4	1.62E-08	14.29	3.97	80.35	0.80	0.1
2017-06-30	911	17.0	6.6	7.64E-08	8.12	2.26	94.06	0.94	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.31 : Moyennes journalières - Juillet 2017

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2017-07-01	912	17.1	1.2	1.39E-08	11.88	3.30	88.71	0.89	0.1
2017-07-02	913	15.8	11.6	1.34E-07	11.54	3.21	86.71	0.87	0.1
2017-07-03	914	16.9	0	0.00E+00	14.42	4.00	63.79	0.64	0.1
2017-07-04	915	17.2	0	0.00E+00	5.96	1.66	50.54	0.51	0.1
2017-07-05	916	19.2	0	0.00E+00	13.67	3.80	55.71	0.56	0.1
2017-07-06	917	22.4	22.4	2.59E-07	14.58	4.05	64.96	0.65	0.1
2017-07-07	918	13.8	1.3	1.50E-08	8.75	2.43	87.21	0.87	0.1
2017-07-08	919	16.1	0	0.00E+00	9.54	2.65	65.54	0.66	0.1
2017-07-09	920	12.5	0	0.00E+00	9.71	2.70	69.38	0.69	0.1
2017-07-10	921	18.2	0	0.00E+00	9.42	2.62	61.25	0.61	0.1
2017-07-11	922	16.8	0	0.00E+00	11.21	3.11	60.21	0.60	0.1
2017-07-12	923	13.5	0	0.00E+00	8.67	2.41	58.63	0.59	0.1
2017-07-13	924	16.2	0	0.00E+00	10.46	2.91	55.17	0.55	0.1
2017-07-14	925	18.9	0	0.00E+00	8.29	2.30	53.42	0.53	0.1
2017-07-15	926	19.0	0	0.00E+00	11.50	3.19	67.67	0.68	0.1
2017-07-16	927	14.8	0	0.00E+00	12.29	3.41	64.33	0.64	0.1
2017-07-17	928	18.6	0	0.00E+00	6.96	1.93	54.25	0.54	0.1
2017-07-18	929	21.5	0	0.00E+00	13.38	3.72	58.75	0.59	0.1
2017-07-19	930	22.1	0	0.00E+00	10.63	2.95	66.13	0.66	0.1
2017-07-20	931	22.3	1	1.16E-08	9.75	2.71	71.46	0.71	0.1
2017-07-21	932	18.1	1	1.16E-08	13.63	3.78	64.79	0.65	0.1
2017-07-22	933	14.9	0	0.00E+00	8.50	2.36	54.67	0.55	0.1
2017-07-23	934	15.0	0	0.00E+00	9.21	2.56	54.00	0.54	0.1
2017-07-24	935	16.1	0	0.00E+00	10.25	2.85	57.00	0.57	0.1
2017-07-25	936	17.2	0	0.00E+00	7.04	1.96	55.96	0.56	0.1
2017-07-26	937	16.6	2.6	3.01E-08	17.29	4.80	81.63	0.82	0.1
2017-07-27	938	15.3	1	1.16E-08	14.75	4.10	77.29	0.77	0.1
2017-07-28	939	16.7	0	0.00E+00	12.58	3.50	61.67	0.62	0.1
2017-07-29	940	19.5	0	0.00E+00	6.50	1.81	70.17	0.70	0.1
2017-07-30	941	21.6	19.8	2.29E-07	9.29	2.58	76.08	0.76	0.1
2017-07-31	942	17.5	0	0.00E+00	8.63	2.40	63.54	0.64	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.32 : Moyennes journalières - Août 2017

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2017-08-01	943	21.4	24.4	2.82E-07	12.04	3.34	80.88	0.81	0.1
2017-08-02	944	12.8	18.4	2.13E-07	11.50	3.19	86.63	0.87	0.1
2017-08-03	945	13.3	0	0.00E+00	6.71	1.86	66.54	0.67	0.1
2017-08-04	946	17.1	22.5	2.60E-07	9.46	2.63	91.17	0.91	0.1
2017-08-05	947	13.0	32.6	3.77E-07	12.33	3.43	95.88	0.96	0.1
2017-08-06	948	9.5	1	1.16E-08	10.46	2.91	85.38	0.85	0.1
2017-08-07	949	12.4	0	0.00E+00	5.54	1.54	72.71	0.73	0.1
2017-08-08	950	13.7	1.2	1.39E-08	10.83	3.01	86.00	0.86	0.1
2017-08-09	951	13.6	0	0.00E+00	9.13	2.53	74.29	0.74	0.1
2017-08-10	952	17.1	2	2.31E-08	8.17	2.27	84.46	0.84	0.1
2017-08-11	953	17.6	46.6	5.39E-07	8.17	2.27	92.17	0.92	0.1
2017-08-12	954	17.4	0	0.00E+00	11.42	3.17	76.13	0.76	0.1
2017-08-13	955	17.1	0	0.00E+00	9.46	2.63	76.67	0.77	0.1
2017-08-14	956	18.0	15.7	1.82E-07	4.67	1.30	91.00	0.91	0.1
2017-08-15	957	13.7	0	0.00E+00	9.71	2.70	81.42	0.81	0.1
2017-08-16	958	14.6	0	0.00E+00	9.92	2.75	75.38	0.75	0.1
2017-08-17	959	16.6	0	0.00E+00	6.83	1.90	74.04	0.74	0.1
2017-08-18	960	16.6	18.4	2.13E-07	13.92	3.87	92.00	0.92	0.1
2017-08-19	961	17.0	1	1.16E-08	12.00	3.33	87.96	0.88	0.1
2017-08-20	962	19.2	0	0.00E+00	11.83	3.29	75.04	0.75	0.1
2017-08-21	963	20.3	0	0.00E+00	10.33	2.87	69.67	0.70	0.1
2017-08-22	964	15.6	18.8	2.18E-07	13.92	3.87	87.88	0.88	0.1
2017-08-23	965	11.9	0	0.00E+00	18.71	5.20	89.58	0.90	0.1
2017-08-24	966	11.2	1	1.16E-08	12.54	3.48	75.33	0.75	0.1
2017-08-25	967	11.2	0	0.00E+00	10.29	2.86	70.63	0.71	0.1
2017-08-26	968	12.5	0	0.00E+00	6.08	1.69	65.50	0.66	0.1
2017-08-27	969	14.1	0	0.00E+00	5.25	1.46	64.79	0.65	0.1
2017-08-28	970	15.4	0	0.00E+00	7.50	2.08	68.58	0.69	0.1
2017-08-29	971	17.3	0	0.00E+00	8.38	2.33	72.71	0.73	0.1
2017-08-30	972	12.2	7.1	8.22E-08	12.83	3.56	87.58	0.88	0.1
2017-08-31	973	9.1	0	0.00E+00	14.38	3.99	79.08	0.79	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)



Tableau A.33 : Moyennes journalières - Septembre 2017

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2017-09-01	974	9.6	1.2	1.39E-08	9.33	2.59	74.00	0.74	0.1
2017-09-02	975	11.6	0	0.00E+00	9.29	2.58	70.04	0.70	0.1
2017-09-03	976	11.3	0	0.00E+00	7.75	2.15	84.79	0.85	0.1
2017-09-04	977	14.5	2.4	2.78E-08	10.79	3.00	86.83	0.87	0.1
2017-09-05	978	12.5	3.4	3.94E-08	7.88	2.19	86.88	0.87	0.1
2017-09-06	979	12.8	0	0.00E+00	7.04	1.96	83.08	0.83	0.1
2017-09-07	980	8.8	23	2.66E-07	14.04	3.90	92.92	0.93	0.1
2017-09-08	981	8.4	0	0.00E+00	13.42	3.73	78.63	0.79	0.1
2017-09-09	982	9.4	1	1.16E-08	6.50	1.81	74.25	0.74	0.1
2017-09-10	983	12.6	0	0.00E+00	8.75	2.43	72.38	0.72	0.1
2017-09-11	984	14.4	0	0.00E+00	13.75	3.82	70.92	0.71	0.1
2017-09-12	985	17.5	0	0.00E+00	12.71	3.53	63.58	0.64	0.1
2017-09-13	986	18.6	0	0.00E+00	11.92	3.31	62.54	0.63	0.1
2017-09-14	987	13.0	0	0.00E+00	10.96	3.04	67.25	0.67	0.1
2017-09-15	988	17.5	0	0.00E+00	8.71	2.42	79.54	0.80	0.1
2017-09-16	989	17.3	0	0.00E+00	9.38	2.60	86.00	0.86	0.1
2017-09-17	990	21.1	1.6	1.85E-08	12.58	3.50	77.92	0.78	0.1
2017-09-18	991	14.1	3.4	3.94E-08	7.17	1.99	85.83	0.86	0.1
2017-09-19	992	14.3	0	0.00E+00	3.92	1.09	75.42	0.75	0.1
2017-09-20	993	16.9	0	0.00E+00	7.96	2.21	69.54	0.70	0.1
2017-09-21	994	19.4	0	0.00E+00	6.25	1.74	82.13	0.82	0.1
2017-09-22	995	23.2	10.2	1.18E-07	10.58	2.94	81.54	0.82	0.1
2017-09-23	996	21.4	0	0.00E+00	8.96	2.49	85.88	0.86	0.1
2017-09-24	997	24.4	1	1.16E-08	7.21	2.00	81.71	0.82	0.1
2017-09-25	998	24.2	0	0.00E+00	12.54	3.48	66.50	0.67	0.1
2017-09-26	999	16.6	0	0.00E+00	10.33	2.87	87.00	0.87	0.1
2017-09-27	1000	12.3	11	1.27E-07	16.75	4.65	82.67	0.83	0.1
2017-09-28	1001	7.3	0	0.00E+00	10.50	2.92	80.96	0.81	0.1
2017-09-29	1002	6.2	1.2	1.39E-08	12.29	3.41	81.29	0.81	0.1
2017-09-30	1003	6.0	0	0.00E+00	8.96	2.49	81.46	0.81	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.34 : Moyennes journalières - Octobre 2017

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2017-10-01	1004	10.4	0	0.00E+00	8.79	2.44	76.58	0.77	0.1
2017-10-02	1005	11.9	0	0.00E+00	7.96	2.21	71.88	0.72	0.1
2017-10-03	1006	16.6	0	0.00E+00	15.54	4.32	63.21	0.63	0.1
2017-10-04	1007	13.6	12	1.39E-07	14.38	3.99	80.46	0.80	0.1
2017-10-05	1008	8.5	1.4	1.62E-08	11.17	3.10	85.71	0.86	0.1
2017-10-06	1009	9.0	0	0.00E+00	9.38	2.60	74.67	0.75	0.1
2017-10-07	1010	11.3	15	1.74E-07	11.75	3.26	95.50	0.96	0.1
2017-10-08	1011	15.8	0	0.00E+00	13.96	3.88	75.63	0.76	0.1
2017-10-09	1012	15.2	0	0.00E+00	7.88	2.19	85.04	0.85	0.1
2017-10-10	1013	6.8	0	0.00E+00	11.67	3.24	62.88	0.63	0.1
2017-10-11	1014	6.2	0	0.00E+00	5.75	1.60	72.92	0.73	0.1
2017-10-12	1015	7.6	0	0.00E+00	9.29	2.58	68.92	0.69	0.1
2017-10-13	1016	11.8	1.6	1.85E-08	12.21	3.39	81.71	0.82	0.1
2017-10-14	1017	8.5	0	0.00E+00	9.83	2.73	65.67	0.66	0.1
2017-10-15	1018	3.2	23	2.66E-07	18.71	5.20	91.00	0.91	0.1
2017-10-16	1019	2.0	0	0.00E+00	12.13	3.37	72.38	0.72	0.1
2017-10-17	1020	10.4	0	0.00E+00	18.29	5.08	65.17	0.65	0.1
2017-10-18	1021	10.0	0	0.00E+00	14.88	4.13	67.04	0.67	0.1
2017-10-19	1022	9.9	0	0.00E+00	19.42	5.39	52.25	0.52	0.1
2017-10-20	1023	9.1	0	0.00E+00	7.21	2.00	64.00	0.64	0.1
2017-10-21	1024	12.3	0	0.00E+00	8.17	2.27	82.79	0.83	0.1
2017-10-22	1025	16.4	1.4	1.62E-08	12.42	3.45	66.04	0.66	0.1
2017-10-23	1026	13.6	12.6	1.46E-07	9.33	2.59	88.04	0.88	0.1
2017-10-24	1027	12.1	5.8	6.71E-08	19.63	5.45	83.54	0.84	0.1
2017-10-25	1028	4.6	1	1.16E-08	17.25	4.79	85.92	0.86	0.1
2017-10-26	1029	2.9	0	0.00E+00	11.17	3.10	91.21	0.91	0.1
2017-10-27	1030	0.5	9.6	1.11E-07	10.63	2.95	89.92	0.90	0.1
2017-10-28	1031	3.8	14.8	1.71E-07	8.46	2.35	97.71	0.98	0.1
2017-10-29	1032	3.4	1	1.16E-08	6.79	1.89	94.46	0.94	0.1
2017-10-30	1033	0.4	11.6	1.34E-07	23.33	6.48	96.71	0.97	0.1
2017-10-31	1034	-2.8	1.4	1.62E-08	17.88	4.97	83.67	0.84	0.8

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.35 : Moyennes journalières - Novembre 2017

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2017-11-01	1035	-1.3	1.2	1.39E-08	7.83	2.18	87.88	0.88	0.8
2017-11-02	1036	2.3	2.9	3.36E-08	9.38	2.60	98.21	0.98	0.5
2017-11-03	1037	0.8	1.1	1.27E-08	15.42	4.28	93.17	0.93	0.5
2017-11-04	1038	-3.5	1.4	1.62E-08	12.38	3.44	86.50	0.87	0.8
2017-11-05	1039	1.7	5.1	5.90E-08	12.33	3.43	96.38	0.96	0.5
2017-11-06	1040	-1.7	0	0.00E+00	13.71	3.81	80.50	0.81	0.5
2017-11-07	1041	-3.4	0	0.00E+00	9.71	2.70	68.38	0.68	0.5
2017-11-08	1042	-1.1	0	0.00E+00	13.71	3.81	65.29	0.65	0.5
2017-11-09	1043	-10.0	10.8	1.25E-07	15.17	4.21	89.21	0.89	0.8
2017-11-10	1044	-14.5	1.1	1.27E-08	20.75	5.76	80.42	0.80	0.8
2017-11-11	1045	-9.7	1.2	1.39E-08	10.50	2.92	82.21	0.82	0.8
2017-11-12	1046	-2.7	0	0.00E+00	9.46	2.63	89.58	0.90	0.5
2017-11-13	1047	-1.9	0	0.00E+00	7.33	2.04	94.71	0.95	0.5
2017-11-14	1048	-1.4	0	0.00E+00	8.42	2.34	92.33	0.92	0.5
2017-11-15	1049	0.8	10.6	1.23E-07	14.92	4.14	97.29	0.97	0.5
2017-11-16	1050	-4.4	2.4	2.78E-08	20.17	5.60	91.75	0.92	0.8
2017-11-17	1051	-9.6	4.5	5.21E-08	10.72	2.98	85.96	0.86	0.8
2017-11-18	1052	-5.0	9.8	1.13E-07	9.71	2.70	96.54	0.97	0.8
2017-11-19	1053	-8.8	0	0.00E+00	20.54	5.71	87.38	0.87	0.5
2017-11-20	1054	-9.8	0	0.00E+00	11.88	3.30	82.67	0.83	0.5
2017-11-21	1055	-3.1	9.6	1.11E-07	19.08	5.30	89.42	0.89	0.8
2017-11-22	1056	-8.5	0	0.00E+00	9.67	2.69	79.46	0.79	0.5
2017-11-23	1057	-7.1	1.2	1.39E-08	14.67	4.07	84.96	0.85	0.8
2017-11-24	1058	-4.8	17	1.97E-07	11.54	3.21	94.42	0.94	0.8
2017-11-25	1059	-3.2	6.1	7.06E-08	15.74	4.37	89.00	0.89	0.8
2017-11-26	1060	-10.8	3.6	4.17E-08	12.91	3.59	85.00	0.85	0.8
2017-11-27	1061	-12.8	0	0.00E+00	11.96	3.32	79.17	0.79	0.5
2017-11-28	1062	-3.0	1.1	1.27E-08	16.54	4.59	86.13	0.86	0.8
2017-11-29	1063	-5.2	0	0.00E+00	21.67	6.02	71.67	0.72	0.5
2017-11-30	1064	-6.2	0	0.00E+00	19.53	5.43	94.53	0.95	0.5

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.36 : Moyennes journalières - Décembre 2017

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2017-12-01	1065	-3.6	0.2	2.31E-09	8.82	2.45	88.71	0.89	0.8
2017-12-02	1066	-0.7	2.7	3.13E-08	9.24	2.57	98.88	0.99	0.8
2017-12-03	1067	0.7	0.5	5.79E-09	14.12	3.92	99.94	1.00	0.8
2017-12-04	1068	0.6	8.1	9.38E-08	23.59	6.55	99.17	0.99	0.8
2017-12-05	1069	2.8	8.8	1.02E-07	30.59	8.50	86.24	0.86	0.5
2017-12-06	1070	-3.5	0	0.00E+00	22.76	6.32	74.76	0.75	0.5
2017-12-07	1071	-9.4	0	0.00E+00	7.94	2.21	87.53	0.88	0.5
2017-12-08	1072	-10.9	0	0.00E+00	16.06	4.46	89.00	0.89	0.5
2017-12-09	1073	-18.7	0	0.00E+00	4.29	1.19	85.82	0.86	0.5
2017-12-10	1074	-18.2	0	0.00E+00	6.24	1.73	84.94	0.85	0.5
2017-12-11	1075	-22.0	0	0.00E+00	10.57	2.94	80.00	0.80	0.5
2017-12-12	1076	-17.8	1.2	1.39E-08	15.17	4.21	81.54	0.82	0.8
2017-12-13	1077	-19.7	0	0.00E+00	17.38	4.83	75.08	0.75	0.5
2017-12-14	1078	-21.2	0	0.00E+00	15.58	4.33	74.75	0.75	0.5
2017-12-15	1079	-19.5	1.2	1.39E-08	7.08	1.97	78.54	0.79	0.8
2017-12-16	1080	-21.2	1.2	1.39E-08	12.00	3.33	77.21	0.77	0.8
2017-12-17	1081	-22.6	0	0.00E+00	6.13	1.70	76.17	0.76	0.5
2017-12-18	1082	-10.0	0	0.00E+00	11.71	3.25	88.63	0.89	0.5
2017-12-19	1083	-3.9	6.8	7.87E-08	12.54	3.48	95.13	0.95	0.8
2017-12-20	1084	-13.7	0	0.00E+00	17.04	4.73	78.63	0.79	0.5
2017-12-21	1085	-21.2	0	0.00E+00	4.75	1.32	75.88	0.76	0.5
2017-12-22	1086	-20.4	0	0.00E+00	5.75	1.60	76.25	0.76	0.5
2017-12-23	1087	-11.6	3.6	4.17E-08	9.33	2.59	86.42	0.86	0.8
2017-12-24	1088	-14.0	0	0.00E+00	9.63	2.67	82.50	0.83	0.5
2017-12-25	1089	-15.8	3.4	3.94E-08	9.42	2.62	84.42	0.84	0.8
2017-12-26	1090	-27.7	0	0.00E+00	14.00	3.89	68.96	0.69	0.5
2017-12-27	1091	-29.8	0	0.00E+00	12.00	3.33	70.25	0.70	0.5
2017-12-28	1092	-23.9	1.2	1.39E-08	10.54	2.93	72.38	0.72	0.8
2017-12-29	1093	-23.0	0	0.00E+00	4.25	1.18	75.71	0.76	0.5
2017-12-30	1094	-25.8	0	0.00E+00	8.13	2.26	75.17	0.75	0.5
2017-12-31	1095	-26.3	0	0.00E+00	9.38	2.60	71.29	0.71	0.5

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.37 : Moyennes journalières – Janvier 2018

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2018-01-01	1096	-29.5	0	0.00E+00	6.00	1.67	71.04	0.71	0.5
2018-01-02	1097	-21.4	1.4	1.62E-08	8.79	2.44	78.92	0.79	0.8
2018-01-03	1098	-17.8	4.6	5.32E-08	11.29	3.14	84.25	0.84	0.8
2018-01-04	1099	-24.5	1	1.16E-08	17.75	4.93	73.29	0.73	0.8
2018-01-05	1100	-28.2	0	0.00E+00	25.33	7.04	67.75	0.68	0.5
2018-01-06	1101	-27.2	1	1.16E-08	16.79	4.66	67.21	0.67	0.8
2018-01-07	1102	-18.1	5	5.79E-08	13.13	3.65	83.54	0.84	0.8
2018-01-08	1103	-6.4	5.2	6.02E-08	10.58	2.94	92.63	0.93	0.8
2018-01-09	1104	-10.1	0	0.00E+00	14.54	4.04	82.00	0.82	0.5
2018-01-10	1105	-7.2	1.1	1.27E-08	12.13	3.37	89.50	0.90	0.8
2018-01-11	1106	-3.3	15	1.74E-07	13.92	3.87	99.83	1.00	0.8
2018-01-12	1107	-20.0	7.2	8.33E-08	16.33	4.54	80.29	0.80	0.8
2018-01-13	1108	-25.5	0	0.00E+00	6.96	1.93	75.96	0.76	0.5
2018-01-14	1109	-22.5	1.2	1.39E-08	6.17	1.71	79.83	0.80	0.8
2018-01-15	1110	-14.7	0	0.00E+00	9.17	2.55	84.96	0.85	0.5
2018-01-16	1111	-16.1	0	0.00E+00	6.17	1.71	81.79	0.82	0.5
2018-01-17	1112	-13.1	1.2	1.39E-08	17.92	4.98	84.58	0.85	0.8
2018-01-18	1113	-8.0	0	0.00E+00	6.21	1.72	91.33	0.91	0.5
2018-01-19	1114	-3.6	4.2	4.86E-08	12.92	3.59	97.79	0.98	0.8
2018-01-20	1115	-7.7	1.5	1.74E-08	16.33	4.54	86.83	0.87	0.8
2018-01-21	1116	-12.3	0	0.00E+00	7.50	2.08	85.54	0.86	0.5
2018-01-22	1117	-14.6	4.6	5.32E-08	16.29	4.53	82.88	0.83	0.8
2018-01-23	1118	-13.4	7.6	8.80E-08	20.96	5.82	85.96	0.86	0.8
2018-01-24	1119	-17.9	0	0.00E+00	16.96	4.71	74.75	0.75	0.5
2018-01-25	1120	-16.6	1.2	1.39E-08	4.88	1.35	73.79	0.74	0.8
2018-01-26	1121	-11.0	1	1.16E-08	11.71	3.25	85.17	0.85	0.8
2018-01-27	1122	0.4	1.4	1.62E-08	18.92	5.25	79.04	0.79	0.5
2018-01-28	1123	-9.8	1.2	1.39E-08	14.46	4.02	76.04	0.76	0.8
2018-01-29	1124	-18.1	0	0.00E+00	9.71	2.70	77.42	0.77	0.5
2018-01-30	1125	-21.6	0	0.00E+00	9.88	2.74	74.79	0.75	0.5
2018-01-31	1126	-17.1	7.8	9.03E-08	13.08	3.63	84.67	0.85	0.8

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.38 : Moyennes journalières – Février 2018

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2018-02-01	1127	-14.8	0	0.00E+00	16.04	4.46	75.29	0.75	0.5
2018-02-02	1128	-23.6	0	0.00E+00	10.88	3.02	72.67	0.73	0.5
2018-02-03	1129	-25.4	1.2	1.39E-08	5.46	1.52	70.79	0.71	0.8
2018-02-04	1130	-20.3	0	0.00E+00	7.92	2.20	71.75	0.72	0.5
2018-02-05	1131	-20.6	0	0.00E+00	7.13	1.98	75.17	0.75	0.5
2018-02-06	1132	-18.9	1	1.16E-08	9.63	2.67	72.29	0.72	0.8
2018-02-07	1133	-17.5	0	0.00E+00	5.38	1.49	77.33	0.77	0.5
2018-02-08	1134	-16.6	1.2	1.39E-08	10.08	2.80	82.96	0.83	0.8
2018-02-09	1135	-19.2	0	0.00E+00	9.96	2.77	75.46	0.75	0.5
2018-02-10	1136	-13.4	0	0.00E+00	8.92	2.48	79.42	0.79	0.5
2018-02-11	1137	-14.0	5	5.79E-08	7.58	2.11	84.63	0.85	0.8
2018-02-12	1138	-16.1	0	0.00E+00	16.63	4.62	66.50	0.67	0.5
2018-02-13	1139	-15.5	1	1.16E-08	17.79	4.94	75.08	0.75	0.8
2018-02-14	1140	-3.7	0	0.00E+00	18.33	5.09	72.33	0.72	0.5
2018-02-15	1141	-9.2	1.4	1.62E-08	10.46	2.91	92.25	0.92	0.8
2018-02-16	1142	-15.5	0	0.00E+00	10.83	3.01	68.21	0.68	0.5
2018-02-17	1143	-9.8	0	0.00E+00	16.54	4.59	70.63	0.71	0.5
2018-02-18	1144	-5.8	2.9	3.36E-08	12.04	3.34	68.04	0.68	0.8
2018-02-19	1145	-8.6	1.1	1.27E-08	15.00	4.17	80.71	0.81	0.8
2018-02-20	1146	-8.1	3.6	4.17E-08	14.42	4.00	88.71	0.89	0.8
2018-02-21	1147	-11.4	2	2.31E-08	15.57	4.32	75.81	0.76	0.8
2018-02-22	1148	-15.3	10.2	1.18E-07	9.10	2.53	59.10	0.59	0.8
2018-02-23	1149	-8.0	6.6	7.64E-08	9.54	2.65	86.83	0.87	0.8
2018-02-24	1150	-4.8	0	0.00E+00	10.42	2.89	74.92	0.75	0.5
2018-02-25	1151	-3.0	6	6.94E-08	26.33	7.31	79.42	0.79	0.8
2018-02-26	1152	-2.6	0	0.00E+00	21.50	5.97	64.88	0.65	0.5
2018-02-27	1153	-0.3	1.1	1.27E-08	12.46	3.46	69.75	0.70	0.8
2018-02-28	1154	-3.4	0	0.00E+00	10.33	2.87	82.83	0.83	0.5

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.39 : Moyennes journalières – Mars 2018

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2018-03-01	1155	-4.5	1	1.16E-08	10.71	2.97	72.25	0.72	0.8
2018-03-02	1156	-6.3	0	0.00E+00	15.17	4.21	69.63	0.70	0.5
2018-03-03	1157	-6.4	0	0.00E+00	11.67	3.24	66.29	0.66	0.5
2018-03-04	1158	-10.2	0	0.00E+00	14.33	3.98	66.33	0.66	0.5
2018-03-05	1159	-11.0	0	0.00E+00	13.00	3.61	76.58	0.77	0.5
2018-03-06	1160	-6.0	1.2	1.39E-08	9.29	2.58	80.21	0.80	0.8
2018-03-07	1161	-1.6	1.2	1.39E-08	11.71	3.25	83.17	0.83	0.8
2018-03-08	1162	-2.3	3.2	3.70E-08	8.92	2.48	82.79	0.83	0.8
2018-03-09	1163	-3.3	7.1	8.22E-08	12.50	3.47	91.00	0.91	0.8
2018-03-10	1164	-6.9	0	0.00E+00	16.17	4.49	84.13	0.84	0.5
2018-03-11	1165	-7.3	0	0.00E+00	8.75	2.43	76.29	0.76	0.5
2018-03-12	1166	-5.6	1.1	1.27E-08	4.54	1.26	74.04	0.74	0.8
2018-03-13	1167	-4.7	1.2	1.39E-08	16.67	4.63	87.54	0.88	0.8
2018-03-14	1168	-5.3	1	1.16E-08	12.96	3.60	73.25	0.73	0.8
2018-03-15	1169	-10.2	0	0.00E+00	20.04	5.57	72.96	0.73	0.5
2018-03-16	1170	-10.7	0	0.00E+00	19.21	5.34	57.38	0.57	0.5
2018-03-17	1171	-16.8	0	0.00E+00	12.33	3.43	47.83	0.48	0.5
2018-03-18	1172	-15.2	0	0.00E+00	8.54	2.37	43.71	0.44	0.5
2018-03-19	1173	-16.3	0	0.00E+00	9.17	2.55	62.25	0.62	0.5
2018-03-20	1174	-12.3	0	0.00E+00	9.58	2.66	50.50	0.51	0.5
2018-03-21	1175	-11.2	0	0.00E+00	12.17	3.38	57.88	0.58	0.5
2018-03-22	1176	-9.0	0	0.00E+00	12.75	3.54	66.00	0.66	0.5
2018-03-23	1177	-8.6	0	0.00E+00	16.63	4.62	64.96	0.65	0.5
2018-03-24	1178	-6.4	0	0.00E+00	16.35	4.54	60.26	0.60	0.5
2018-03-25	1179	-5.9	0	0.00E+00	6.25	1.74	46.54	0.47	0.5
2018-03-26	1180	1.2	0	0.00E+00	14.46	4.02	42.21	0.42	0.5
2018-03-27	1181	0.7	6.2	7.18E-08	15.13	4.20	74.17	0.74	0.5
2018-03-28	1182	0.6	1.2	1.39E-08	8.21	2.28	83.13	0.83	0.5
2018-03-29	1183	1.3	0	0.00E+00	10.00	2.78	82.17	0.82	0.5
2018-03-30	1184	-5.1	0	0.00E+00	11.71	3.25	59.75	0.60	0.5
2018-03-31	1185	-7.1	13	1.50E-07	10.38	2.88	80.75	0.81	0.8

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.40 : Moyennes journalières – Avril 2018

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2018-04-01	1186	-9.0	1.4	1.62E-08	15.63	4.34	72.13	0.72	0.8
2018-04-02	1187	-7.4	1.4	1.62E-08	14.42	4.00	78.21	0.78	0.8
2018-04-03	1188	-9.6	0	0.00E+00	13.46	3.74	66.25	0.66	0.5
2018-04-04	1189	-13.4	5.4	6.25E-08	26.83	7.45	71.67	0.72	0.8
2018-04-05	1190	-11.8	1.2	1.39E-08	13.08	3.63	54.08	0.54	0.8
2018-04-06	1191	-4.6	0	0.00E+00	10.08	2.80	67.58	0.68	0.5
2018-04-07	1192	-10.0	0	0.00E+00	13.92	3.87	71.04	0.71	0.5
2018-04-08	1193	-11.4	0	0.00E+00	9.25	2.57	65.50	0.66	0.5
2018-04-09	1194	-8.7	1	1.16E-08	6.13	1.70	58.54	0.59	0.8
2018-04-10	1195	-3.2	0	0.00E+00	9.13	2.53	49.50	0.50	0.5
2018-04-11	1196	-0.6	1	1.16E-08	12.33	3.43	75.17	0.75	0.8
2018-04-12	1197	-1.6	1.2	1.39E-08	7.75	2.15	86.67	0.87	0.8
2018-04-13	1198	-4.4	0	0.00E+00	11.83	3.29	56.58	0.57	0.5
2018-04-14	1199	-10.4	0	0.00E+00	16.04	4.46	51.54	0.52	0.5
2018-04-15	1200	-7.6	3.2	3.70E-08	23.13	6.42	49.79	0.50	0.8
2018-04-16	1201	-2.4	16.4	1.90E-07	20.08	5.58	94.25	0.94	0.8
2018-04-17	1202	1.7	5.6	6.48E-08	10.92	3.03	92.92	0.93	0.5
2018-04-18	1203	-2.3	2	2.31E-08	21.71	6.03	87.92	0.88	0.8
2018-04-19	1204	-4.4	1.2	1.39E-08	23.92	6.64	78.58	0.79	0.8
2018-04-20	1205	-0.8	0	0.00E+00	13.00	3.61	58.92	0.59	0.5
2018-04-21	1206	1.6	0	0.00E+00	6.88	1.91	40.42	0.40	0.5
2018-04-22	1207	5.3	0	0.00E+00	5.92	1.64	32.67	0.33	0.5
2018-04-23	1208	7.6	0	0.00E+00	14.50	4.03	29.25	0.29	0.5
2018-04-24	1209	9.7	0	0.00E+00	11.79	3.28	34.63	0.35	0.5
2018-04-25	1210	1.4	0	0.00E+00	13.54	3.76	76.71	0.77	0.5
2018-04-26	1211	6.0	0	0.00E+00	8.58	2.38	50.42	0.50	0.5
2018-04-27	1212	-0.7	0	0.00E+00	13.92	3.87	78.71	0.79	0.5
2018-04-28	1213	-2.7	3.6	4.17E-08	19.63	5.45	60.21	0.60	0.8
2018-04-29	1214	-0.3	0	0.00E+00	9.79	2.72	40.13	0.40	0.5
2018-04-30	1215	7.6	1	1.16E-08	9.17	2.55	31.25	0.31	0.5

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)



Tableau A.41 : Moyennes journalières – Mai 2018

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2018-05-01	1216	13.8	0	0.00E+00	12.92	3.59	39.04	0.39	0.5
2018-05-02	1217	7.4	5.6	6.48E-08	8.71	2.42	80.58	0.81	0.5
2018-05-03	1218	6.1	0	0.00E+00	7.25	2.01	75.95	0.76	0.5
2018-05-04	1219	3.2	13.6	1.57E-07	8.29	2.30	93.50	0.94	0.5
2018-05-05	1220	7.0	0	0.00E+00	13.79	3.83	76.61	0.77	0.5
2018-05-06	1221	4.0	0	0.00E+00	9.96	2.77	59.21	0.59	0.5
2018-05-07	1222	7.7	0	0.00E+00	14.96	4.16	43.08	0.43	0.1
2018-05-08	1223	9.5	0	0.00E+00	15.25	4.24	43.79	0.44	0.1
2018-05-09	1224	13.0	0	0.00E+00	13.96	3.88	36.00	0.36	0.1
2018-05-10	1225	7.6	7.8	9.03E-08	20.92	5.81	77.92	0.78	0.1
2018-05-11	1226	3.8	0	0.00E+00	12.63	3.51	43.00	0.43	0.1
2018-05-12	1227	8.1	0	0.00E+00	9.33	2.59	37.42	0.37	0.1
2018-05-13	1228	11.8	0	0.00E+00	17.63	4.90	34.38	0.34	0.1
2018-05-14	1229	13.0	0	0.00E+00	13.04	3.62	38.33	0.38	0.1
2018-05-15	1230	3.2	0	0.00E+00	13.33	3.70	57.79	0.58	0.1
2018-05-16	1231	6.8	1.6	1.85E-08	13.63	3.78	64.92	0.65	0.1
2018-05-17	1232	4.2	0	0.00E+00	14.38	3.99	49.96	0.50	0.1
2018-05-18	1233	6.7	0	0.00E+00	11.58	3.22	38.46	0.38	0.1
2018-05-19	1234	11.4	14.6	1.69E-07	9.58	2.66	58.17	0.58	0.1
2018-05-20	1235	9.0	0	0.00E+00	15.17	4.21	55.17	0.55	0.1
2018-05-21	1236	16.1	0	0.00E+00	12.38	3.44	40.21	0.40	0.1
2018-05-22	1237	17.5	0	0.00E+00	13.50	3.75	37.38	0.37	0.1
2018-05-23	1238	8.1	0	0.00E+00	12.71	3.53	41.13	0.41	0.1
2018-05-24	1239	17.6	0	0.00E+00	13.58	3.77	33.46	0.33	0.1
2018-05-25	1240	20.7	10.6	1.23E-07	14.21	3.95	62.08	0.62	0.1
2018-05-26	1241	15.3	0	0.00E+00	12.92	3.59	48.17	0.48	0.1
2018-05-27	1242	17.1	2.2	2.55E-08	10.25	2.85	73.33	0.73	0.1
2018-05-28	1243	16.5	0	0.00E+00	13.88	3.85	74.58	0.75	0.1
2018-05-29	1244	12.1	0	0.00E+00	9.17	2.55	49.00	0.49	0.1
2018-05-30	1245	19.3	0	0.00E+00	9.08	2.52	43.21	0.43	0.1
2018-05-31	1246	20.1	0	0.00E+00	16.96	4.71	75.88	0.76	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.42 : Moyennes journalières – Juin 2018

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2018-06-01	1247	8.2	0	0.00E+00	16.46	4.57	88.79	0.89	0.1
2018-06-02	1248	9.4	0	0.00E+00	16.75	4.65	52.67	0.53	0.1
2018-06-03	1249	15.6	5	5.79E-08	15.67	4.35	46.38	0.46	0.1
2018-06-04	1250	11.9	3	3.47E-08	12.83	3.56	97.21	0.97	0.1
2018-06-05	1251	8.9	1.8	2.08E-08	15.25	4.24	86.29	0.86	0.1
2018-06-06	1252	11.9	1	1.16E-08	7.38	2.05	58.00	0.58	0.1
2018-06-07	1253	12.8	0	0.00E+00	12.29	3.41	75.33	0.75	0.1
2018-06-08	1254	14.0	0	0.00E+00	11.92	3.31	60.33	0.60	0.1
2018-06-09	1255	13.0	0	0.00E+00	9.21	2.56	41.38	0.41	0.1
2018-06-10	1256	13.9	0	0.00E+00	8.67	2.41	38.21	0.38	0.1
2018-06-11	1257	15.0	0	0.00E+00	6.42	1.78	39.96	0.40	0.1
2018-06-12	1258	20.0	0	0.00E+00	15.17	4.21	37.67	0.38	0.1
2018-06-13	1259	15.1	28.8	3.33E-07	9.79	2.72	86.04	0.86	0.1
2018-06-14	1260	15.4	2	2.31E-08	16.54	4.59	73.54	0.74	0.1
2018-06-15	1261	15.4	0	0.00E+00	8.33	2.31	44.88	0.45	0.1
2018-06-16	1262	19.8	0	0.00E+00	10.13	2.81	54.54	0.55	0.1
2018-06-17	1263	20.8	8.6	9.95E-08	9.92	2.75	85.29	0.85	0.1
2018-06-18	1264	15.0	4.8	5.56E-08	12.21	3.39	86.46	0.86	0.1
2018-06-19	1265	15.3	0	0.00E+00	8.92	2.48	60.17	0.60	0.1
2018-06-20	1266	10.6	0	0.00E+00	13.04	3.62	61.79	0.62	0.1
2018-06-21	1267	10.6	0	0.00E+00	7.46	2.07	56.21	0.56	0.1
2018-06-22	1268	17.3	0	0.00E+00	10.25	2.85	50.63	0.51	0.1
2018-06-23	1269	18.3	0	0.00E+00	10.13	2.81	54.67	0.55	0.1
2018-06-24	1270	12.9	0	0.00E+00	15.00	4.17	57.42	0.57	0.1
2018-06-25	1271	11.2	0	0.00E+00	9.17	2.55	50.08	0.50	0.1
2018-06-26	1272	16.4	0	0.00E+00	10.08	2.80	52.71	0.53	0.1
2018-06-27	1273	19.8	0	0.00E+00	7.33	2.04	49.50	0.50	0.1
2018-06-28	1274	21.6	2.8	3.24E-08	8.92	2.48	72.88	0.73	0.1
2018-06-29	1275	23.1	5	5.79E-08	8.79	2.44	66.21	0.66	0.1
2018-06-30	1276	21.4	8.4	9.72E-08	7.17	1.99	91.42	0.91	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.43 : Moyennes journalières – Juillet 2018

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2018-07-01	1277	24.4	14.8	1.71E-07	11.29	3.14	87.67	0.88	0.1
2018-07-02	1278	23.1	0	0.00E+00	16.88	4.69	63.63	0.64	0.1
2018-07-03	1279	24.1	0	0.00E+00	10.50	2.92	60.54	0.61	0.1
2018-07-04	1280	26.1	0	0.00E+00	9.46	2.63	60.79	0.61	0.1
2018-07-05	1281	22.8	1	1.16E-08	17.92	4.98	57.79	0.58	0.1
2018-07-06	1282	14.9	0	0.00E+00	18.33	5.09	56.54	0.57	0.1
2018-07-07	1283	19.7	0	0.00E+00	12.79	3.55	53.92	0.54	0.1
2018-07-08	1284	23.5	0	0.00E+00	21.38	5.94	42.79	0.43	0.1
2018-07-09	1285	20.0	4.6	5.32E-08	13.67	3.80	75.63	0.76	0.1
2018-07-10	1286	17.3	0	0.00E+00	11.63	3.23	53.88	0.54	0.1
2018-07-11	1287	17.7	0	0.00E+00	8.54	2.37	53.42	0.53	0.1
2018-07-12	1288	19.7	0	0.00E+00	7.42	2.06	48.79	0.49	0.1
2018-07-13	1289	19.4	0	0.00E+00	12.92	3.59	76.79	0.77	0.1
2018-07-14	1290	22.9	0	0.00E+00	10.58	2.94	73.63	0.74	0.1
2018-07-15	1291	23.0	0	0.00E+00	9.04	2.51	66.88	0.67	0.1
2018-07-16	1292	20.5	9.2	1.06E-07	8.79	2.44	75.63	0.76	0.1
2018-07-17	1293	14.3	0	0.00E+00	12.96	3.60	70.58	0.71	0.1
2018-07-18	1294	15.3	0	0.00E+00	9.71	2.70	58.08	0.58	0.1
2018-07-19	1295	21.1	0	0.00E+00	13.54	3.76	56.50	0.57	0.1
2018-07-20	1296	22.6	0	0.00E+00	10.75	2.99	50.13	0.50	0.1
2018-07-21	1297	24.4	0	0.00E+00	9.46	2.63	49.58	0.50	0.1
2018-07-22	1298	24.9	0	0.00E+00	12.67	3.52	54.00	0.54	0.1
2018-07-23	1299	20.7	41.2	4.77E-07	8.50	2.36	92.21	0.92	0.1
2018-07-24	1300	22.0	24.8	2.87E-07	8.29	2.30	93.46	0.93	0.1
2018-07-25	1301	22.6	1	1.16E-08	5.38	1.49	81.96	0.82	0.1
2018-07-26	1302	20.3	0	0.00E+00	9.29	2.58	76.75	0.77	0.1
2018-07-27	1303	17.8	1.8	2.08E-08	9.58	2.66	79.29	0.79	0.1
2018-07-28	1304	14.9	4.6	5.32E-08	9.08	2.52	87.04	0.87	0.1
2018-07-29	1305	17.9	4	4.63E-08	8.75	2.43	76.96	0.77	0.1
2018-07-30	1306	20.4	0	0.00E+00	8.63	2.40	71.75	0.72	0.1
2018-07-31	1307	21.4	0	0.00E+00	8.13	2.26	66.38	0.66	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.44 : Moyennes journalières – Août 2018

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2018-08-01	1308	19.5	0	0.00E+00	6.29	1.75	70.00	0.70	0.1
2018-08-02	1309	18.2	12.4	1.44E-07	7.25	2.01	89.29	0.89	0.1
2018-08-03	1310	17.9	0	0.00E+00	5.75	1.60	81.17	0.81	0.1
2018-08-04	1311	21.3	0	0.00E+00	8.25	2.29	76.13	0.76	0.1
2018-08-05	1312	24.1	3.6	4.17E-08	14.17	3.94	70.58	0.71	0.1
2018-08-06	1313	21.3	14.6	1.69E-07	7.63	2.12	92.33	0.92	0.1
2018-08-07	1314	17.6	0	0.00E+00	6.38	1.77	88.08	0.88	0.1
2018-08-08	1315	20.0	0	0.00E+00	6.29	1.75	79.92	0.80	0.1
2018-08-09	1316	17.4	0	0.00E+00	11.54	3.21	73.50	0.74	0.1
2018-08-10	1317	18.7	0	0.00E+00	8.58	2.38	68.25	0.68	0.1
2018-08-11	1318	21.1	0	0.00E+00	7.08	1.97	76.71	0.77	0.1
2018-08-12	1319	22.0	0	0.00E+00	5.83	1.62	73.29	0.73	0.1
2018-08-13	1320	22.7	0	0.00E+00	7.54	2.09	71.29	0.71	0.1
2018-08-14	1321	22.7	8.6	9.95E-08	12.25	3.40	72.79	0.73	0.1
2018-08-15	1322	11.3	0	0.00E+00	9.67	2.69	74.25	0.74	0.1
2018-08-16	1323	15.8	0	0.00E+00	6.33	1.76	70.17	0.70	0.1
2018-08-17	1324	17.0	0	0.00E+00	10.42	2.89	78.25	0.78	0.1
2018-08-18	1325	14.6	0	0.00E+00	7.25	2.01	65.54	0.66	0.1
2018-08-19	1326	17.7	0	0.00E+00	7.71	2.14	65.04	0.65	0.1
2018-08-20	1327	21.2	0	0.00E+00	7.33	2.04	65.42	0.65	0.1
2018-08-21	1328	18.3	19.3	2.23E-07	7.71	2.14	84.96	0.85	0.1
2018-08-22	1329	15.1	4.7	5.44E-08	16.46	4.57	75.00	0.75	0.1
2018-08-23	1330	17.8	0	0.00E+00	12.00	3.33	64.67	0.65	0.1
2018-08-24	1331	18.5	0	0.00E+00	12.54	3.48	66.79	0.67	0.1
2018-08-25	1332	18.8	0	0.00E+00	9.42	2.62	78.13	0.78	0.1
2018-08-26	1333	20.9	1.2	1.39E-08	7.58	2.11	89.17	0.89	0.1
2018-08-27	1334	19.2	0	0.00E+00	11.92	3.31	91.96	0.92	0.1
2018-08-28	1335	16.2	10.4	1.20E-07	15.04	4.18	92.38	0.92	0.1
2018-08-29	1336	8.4	11.6	1.34E-07	13.00	3.61	95.83	0.96	0.1
2018-08-30	1337	10.1	0	0.00E+00	4.75	1.32	84.50	0.85	0.1
2018-08-31	1338	14.3	0	0.00E+00	9.92	2.75	71.08	0.71	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.45 : Moyennes journalières – Septembre 2018

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2018-09-01	1339	16.8	21.6	2.50E-07	11.71	3.25	93.75	0.94	0.1
2018-09-02	1340	21.0	0	0.00E+00	6.42	1.78	91.29	0.91	0.1
2018-09-03	1341	18.2	0	0.00E+00	13.88	3.85	77.50	0.78	0.1
2018-09-04	1342	16.4	8.4	9.72E-08	8.17	2.27	81.21	0.81	0.1
2018-09-05	1343	17.6	40.2	4.65E-07	11.08	3.08	97.96	0.98	0.1
2018-09-06	1344	13.0	0	0.00E+00	10.13	2.81	76.50	0.77	0.1
2018-09-07	1345	10.3	0	0.00E+00	12.08	3.36	68.54	0.69	0.1
2018-09-08	1346	8.8	0	0.00E+00	9.42	2.62	68.58	0.69	0.1
2018-09-09	1347	9.5	0	0.00E+00	6.63	1.84	66.04	0.66	0.1
2018-09-10	1348	10.7	0	0.00E+00	9.33	2.59	74.42	0.74	0.1
2018-09-11	1349	15.1	0	0.00E+00	11.13	3.09	79.58	0.80	0.1
2018-09-12	1350	17.1	0	0.00E+00	10.54	2.93	82.38	0.82	0.1
2018-09-13	1351	20.2	0	0.00E+00	7.92	2.20	77.50	0.78	0.1
2018-09-14	1352	20.3	0	0.00E+00	8.17	2.27	82.75	0.83	0.1
2018-09-15	1353	15.9	10.6	1.23E-07	8.92	2.48	94.79	0.95	0.1
2018-09-16	1354	17.4	0	0.00E+00	10.25	2.85	89.67	0.90	0.1
2018-09-17	1355	17.5	5.6	6.48E-08	16.38	4.55	81.92	0.82	0.1
2018-09-18	1356	6.5	0	0.00E+00	10.04	2.79	93.21	0.93	0.1
2018-09-19	1357	8.8	0	0.00E+00	5.25	1.46	83.00	0.83	0.1
2018-09-20	1358	12.1	0	0.00E+00	5.88	1.63	77.04	0.77	0.1
2018-09-21	1359	14.6	13.5	1.56E-07	25.17	6.99	87.88	0.88	0.1
2018-09-22	1360	6.9	0	0.00E+00	15.29	4.25	69.96	0.70	0.1
2018-09-23	1361	3.2	1	1.16E-08	10.96	3.04	64.38	0.64	0.1
2018-09-24	1362	5.4	0	0.00E+00	15.92	4.42	63.88	0.64	0.1
2018-09-25	1363	13.9	0	0.00E+00	13.58	3.77	88.88	0.89	0.1
2018-09-26	1364	10.8	7.6	8.80E-08	12.29	3.41	92.04	0.92	0.1
2018-09-27	1365	9.4	0	0.00E+00	12.21	3.39	77.17	0.77	0.1
2018-09-28	1366	6.0	15.6	1.81E-07	11.54	3.21	93.08	0.93	0.1
2018-09-29	1367	4.8	1.2	1.39E-08	10.63	2.95	85.38	0.85	0.1
2018-09-30	1368	3.8	0	0.00E+00	9.29	2.58	68.42	0.68	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

Tableau A.46 : Moyennes journalières – Octobre 2018

Date	Temps	Température moyenne ECCC	Précipitations totales ECCC	Précipitations totales Conversion	Vitesse moyenne du vent ECCC	Vitesse moyenne du vent Conversion	Humidité relative ECCC	Humidité relative Conversion	Albédo
	(j)	(°C)	(mm)	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(%)	(-)	(-)
2018-10-01	1369	4.2	0	0.00E+00	9.50	2.64	71.08	0.71	0.1
2018-10-02	1370	6.8	0	0.00E+00	4.83	1.34	77.54	0.78	0.1
2018-10-03	1371	8.5	11	1.27E-07	11.79	3.28	88.21	0.88	0.1
2018-10-04	1372	8.2	11.6	1.34E-07	21.58	6.00	75.46	0.75	0.1
2018-10-05	1373	0.1	0	0.00E+00	6.71	1.86	73.92	0.74	0.1
2018-10-06	1374	2.8	1.6	1.85E-08	9.96	2.77	88.00	0.88	0.1
2018-10-07	1375	2.4	0	0.00E+00	8.67	2.41	82.96	0.83	0.1
2018-10-08	1376	4.2	10.4	1.20E-07	10.13	2.81	90.58	0.91	0.1
2018-10-09	1377	5.7	36.6	4.24E-07	8.13	2.26	99.83	1.00	0.1
2018-10-10	1378	3.4	43.4	5.02E-07	19.92	5.53	99.33	0.99	0.1
2018-10-11	1379	7.4	11.6	1.34E-07	15.92	4.42	91.47	0.91	0.1
2018-10-12	1380	1.2	0	0.00E+00	18.13	5.03	77.29	0.77	0.1
2018-10-13	1381	0.4	0	0.00E+00	12.08	3.36	73.46	0.73	0.1
2018-10-14	1382	4.0	1.1	1.27E-08	7.46	2.07	90.00	0.90	0.1
2018-10-15	1383	2.6	20.2	2.34E-07	11.50	3.19	99.13	0.99	0.1
2018-10-16	1384	1.0	4.8	5.56E-08	13.42	3.73	96.67	0.97	0.1
2018-10-17	1385	-1.5	2.1	2.43E-08	19.88	5.52	81.25	0.81	0.8
2018-10-18	1386	-2.8	0	0.00E+00	13.13	3.65	75.04	0.75	0.1
2018-10-19	1387	5.4	15.8	1.83E-07	18.71	5.20	86.96	0.87	0.1

Provenance des données manquantes à la station de Rouyn-Noranda Aéroport :

- Moyennes à partir de données horaires

- Données Station Mont Brun (5988)

- Données Station Val-d'Or Aéroport (50720)

- Données Station Val-d'Or (30172)

**ANNEXE D DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES OBTENUES PAR  
SIMULATIONS CLIMATIQUES DE LA STATION DE VAL-D'OR**

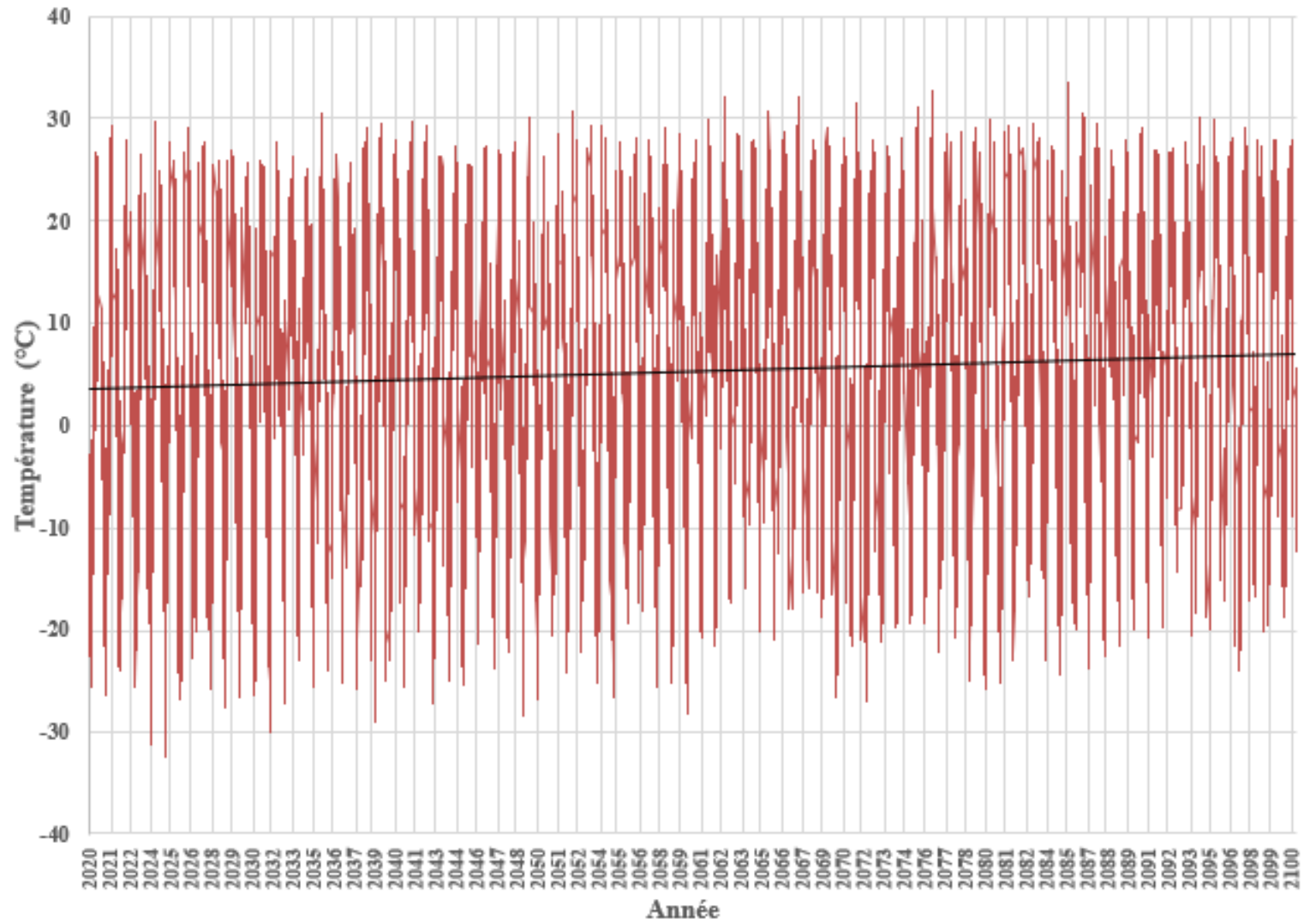


Figure A.18 : Évolution des températures moyennes journalières obtenues par simulation climatique à partir du modèle climatique CanESM2



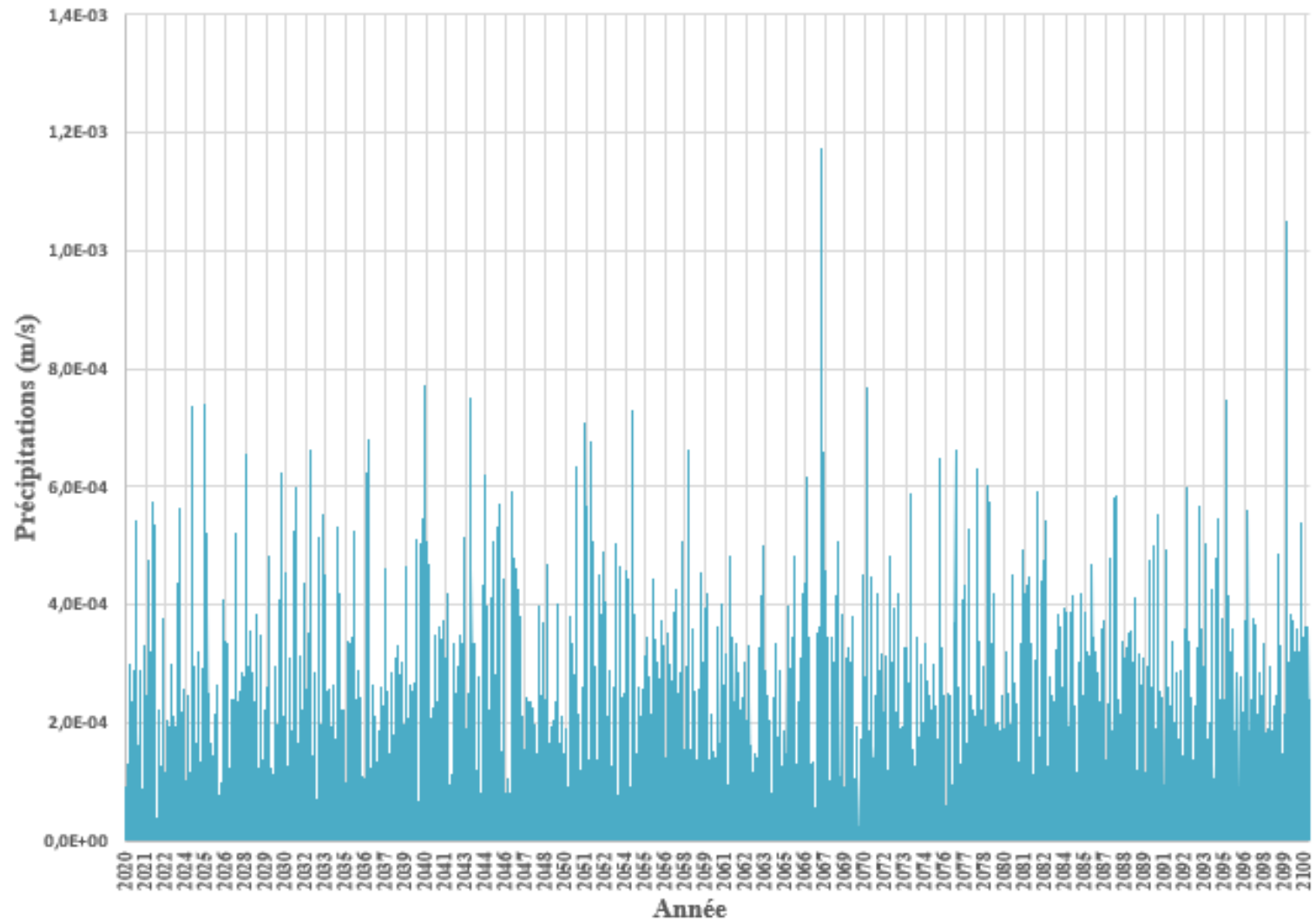


Figure A.19 : Évolution des précipitations moyennes journalières obtenues par simulation climatique à partir du modèle climatique CanESM2

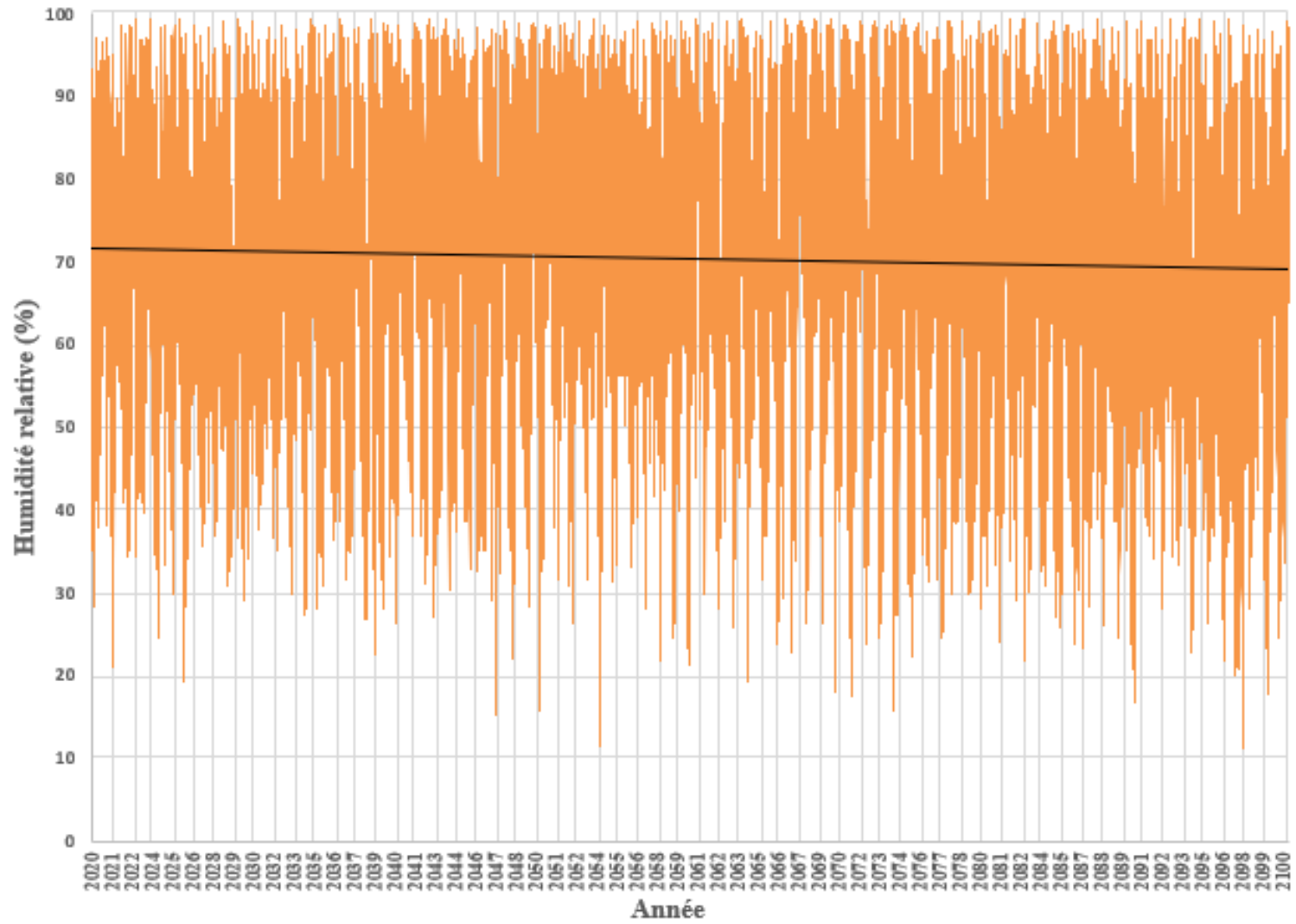


Figure A.20 : Évolution de l'humidité relative moyenne journalière obtenue par simulation climatique à partir du modèle climatique CanESM2

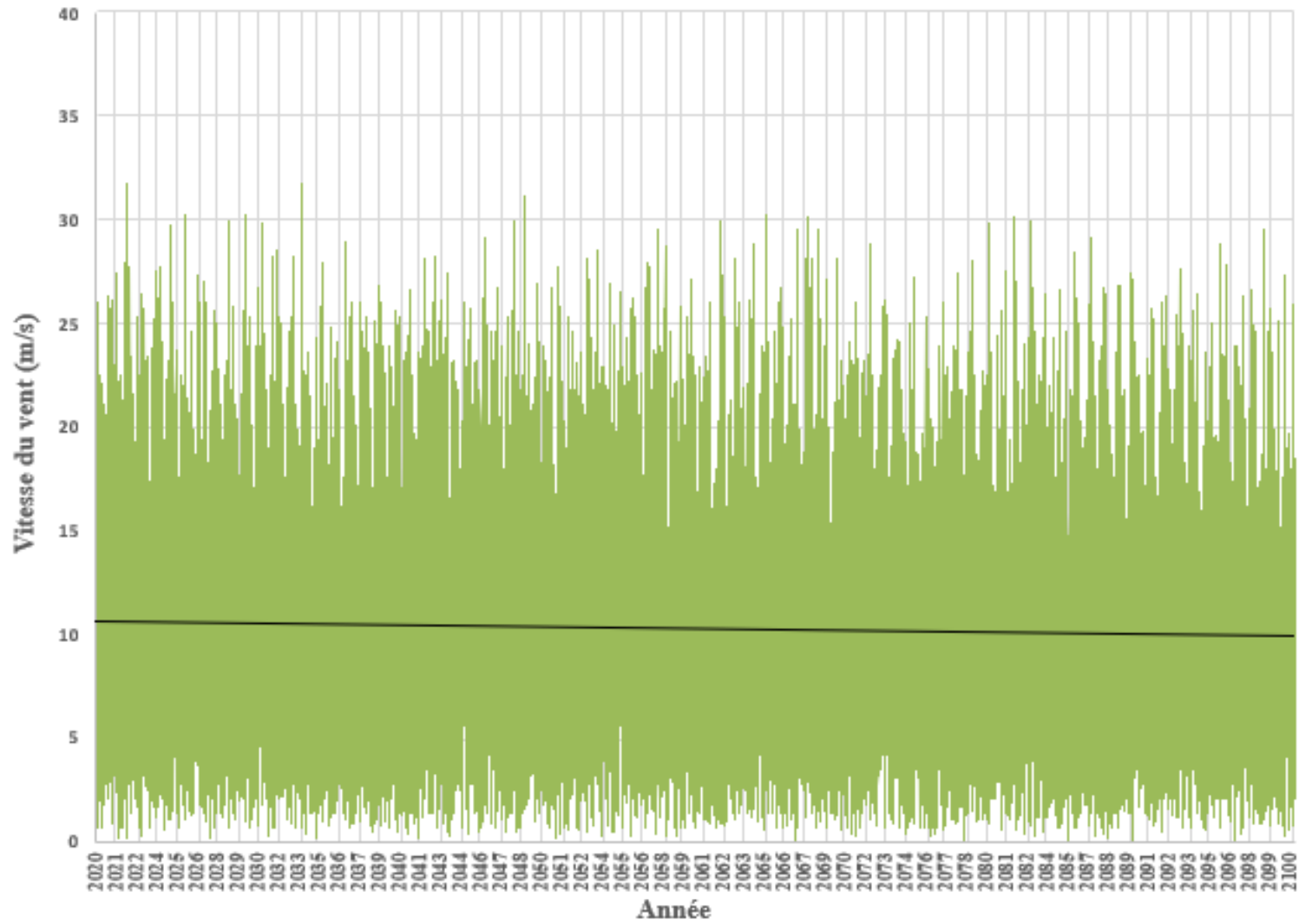


Figure A.21 : Évolution de la vitesse du vent moyenne journalière obtenue par simulation climatique à partir du modèle climatique CanESM2

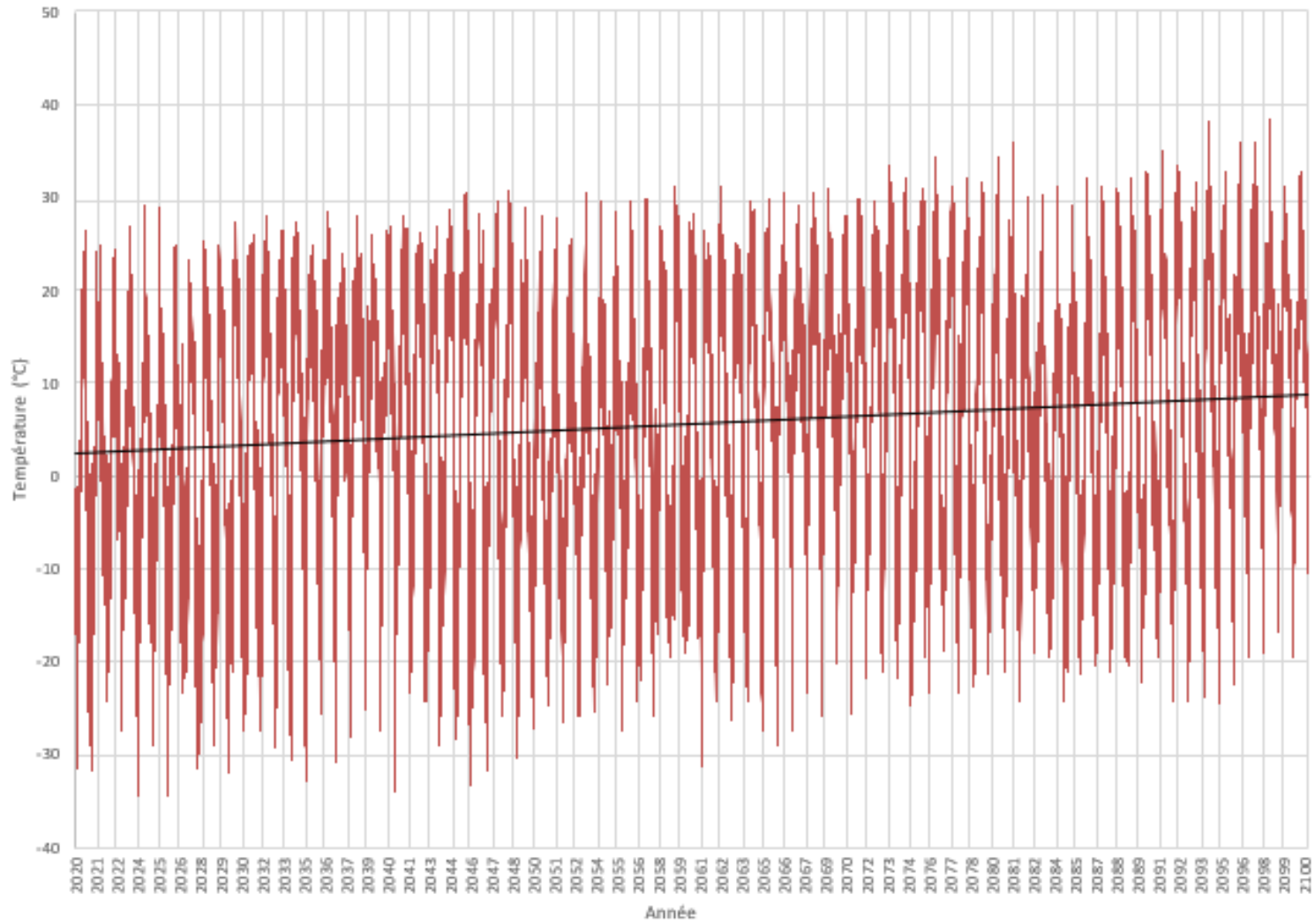


Figure A.22 : Évolution des températures moyennes journalières obtenues par simulation climatique à partir du modèle climatique IPSL-CM5A-MR

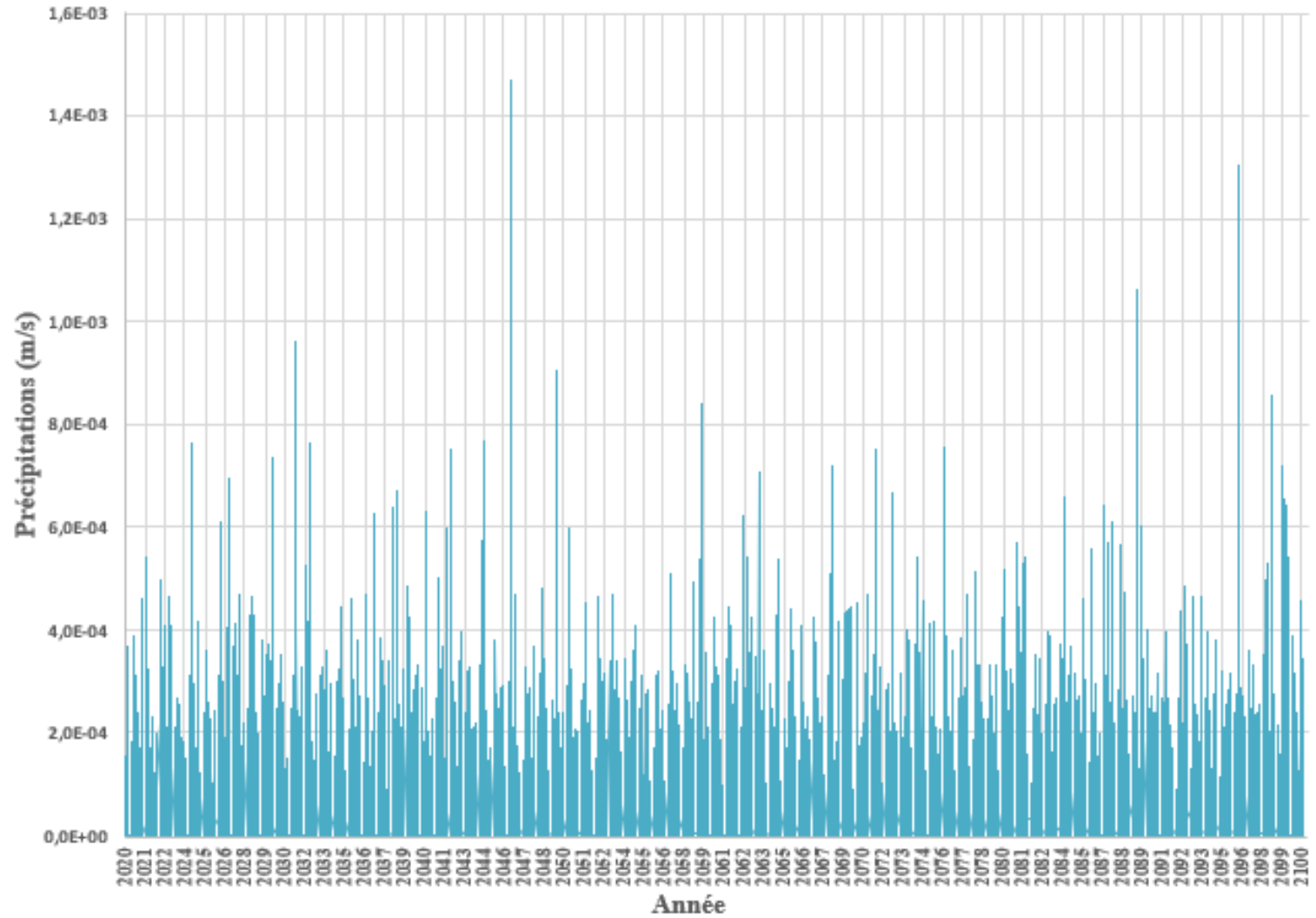


Figure A.23 : Évolution des précipitations moyennes journalières obtenues par simulation climatique à partir du modèle climatique IPSL-CM5A-MR

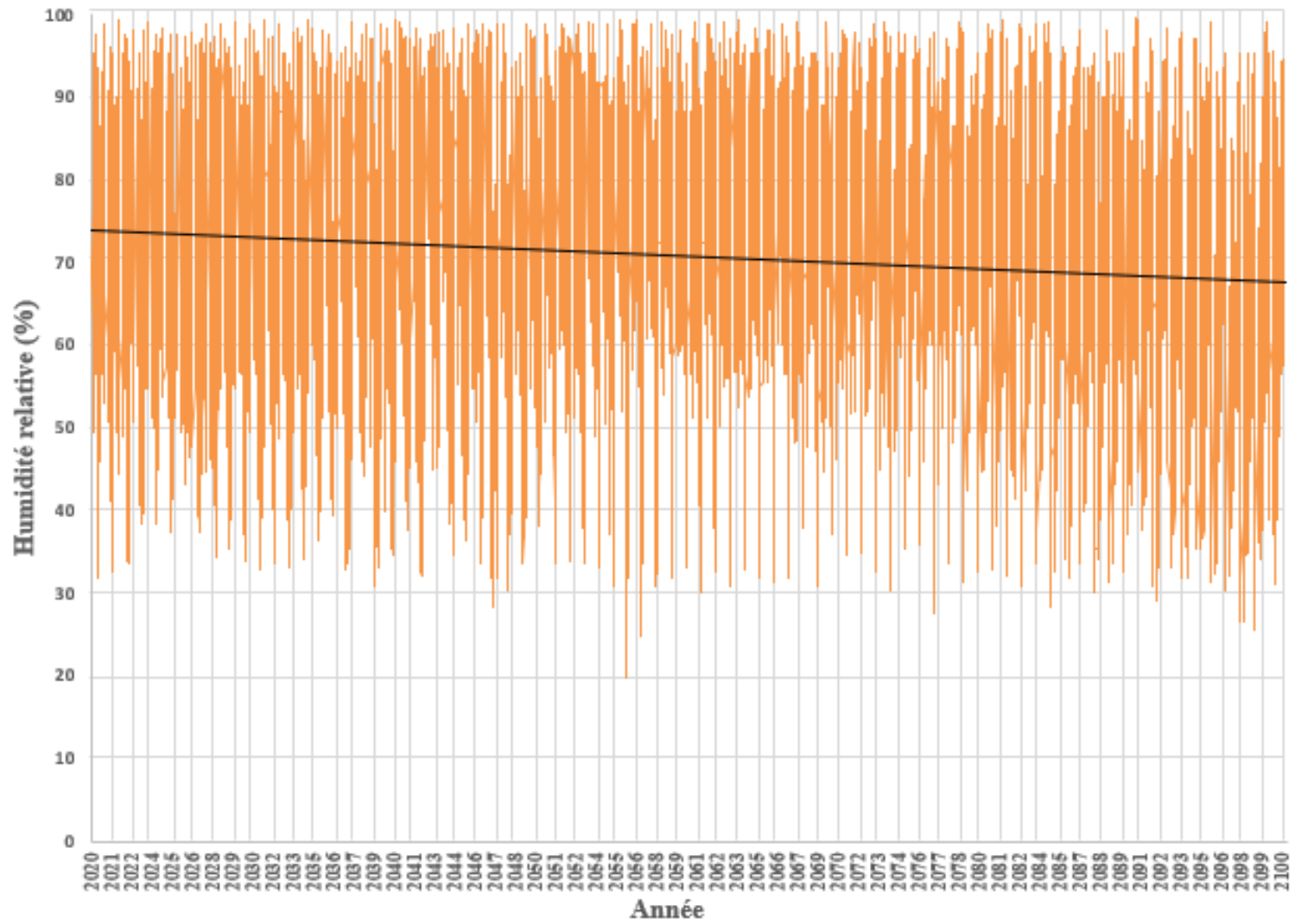


Figure A.24 : Évolution de l'humidité relative moyenne journalière obtenue par simulation climatique à partir du modèle climatique IPSL-CM5A-MR

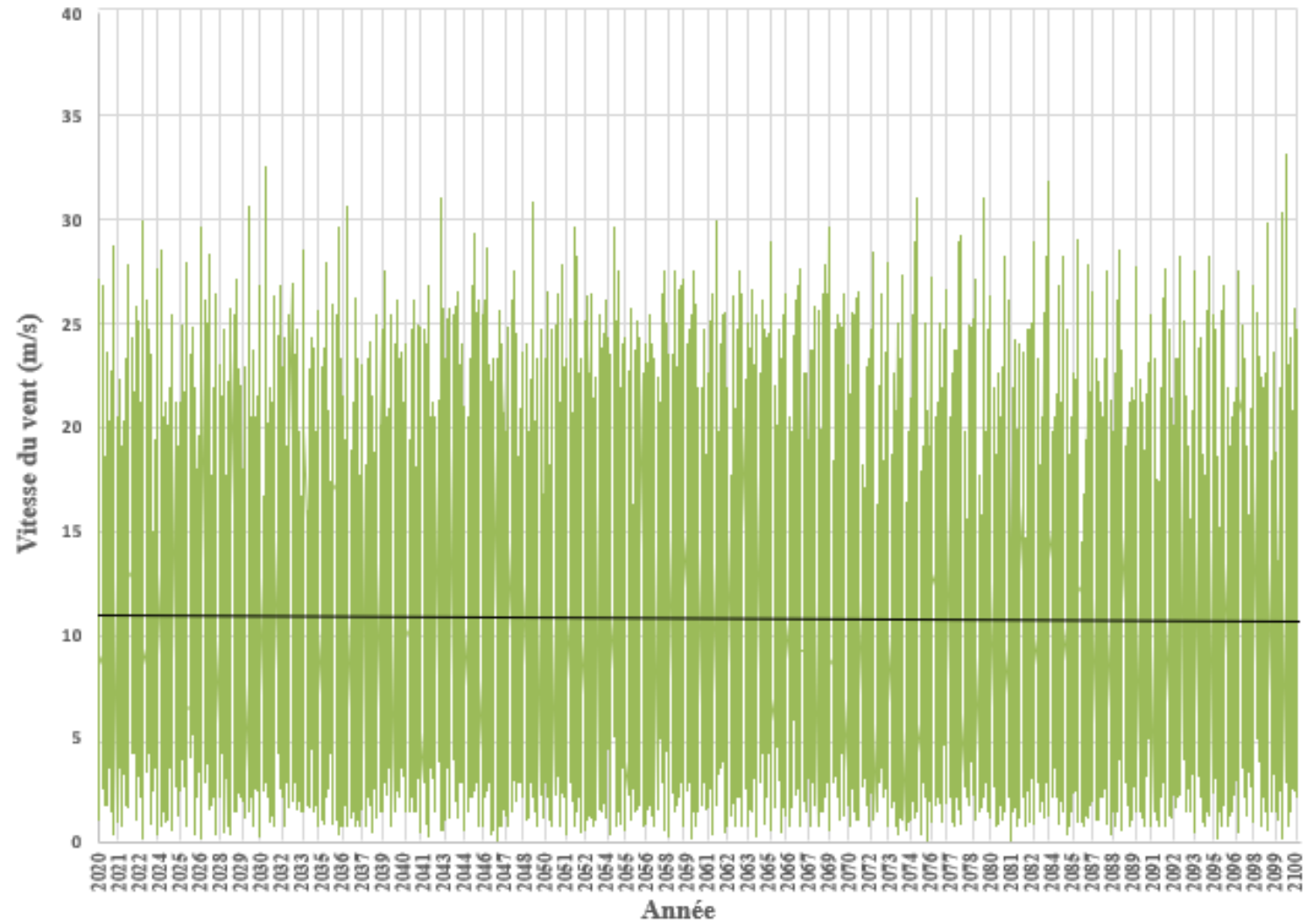


Figure A.25 : Évolution de la vitesse du vent moyenne journalière obtenue par simulation climatique à partir du modèle climatique IPSL-CM5A-MR

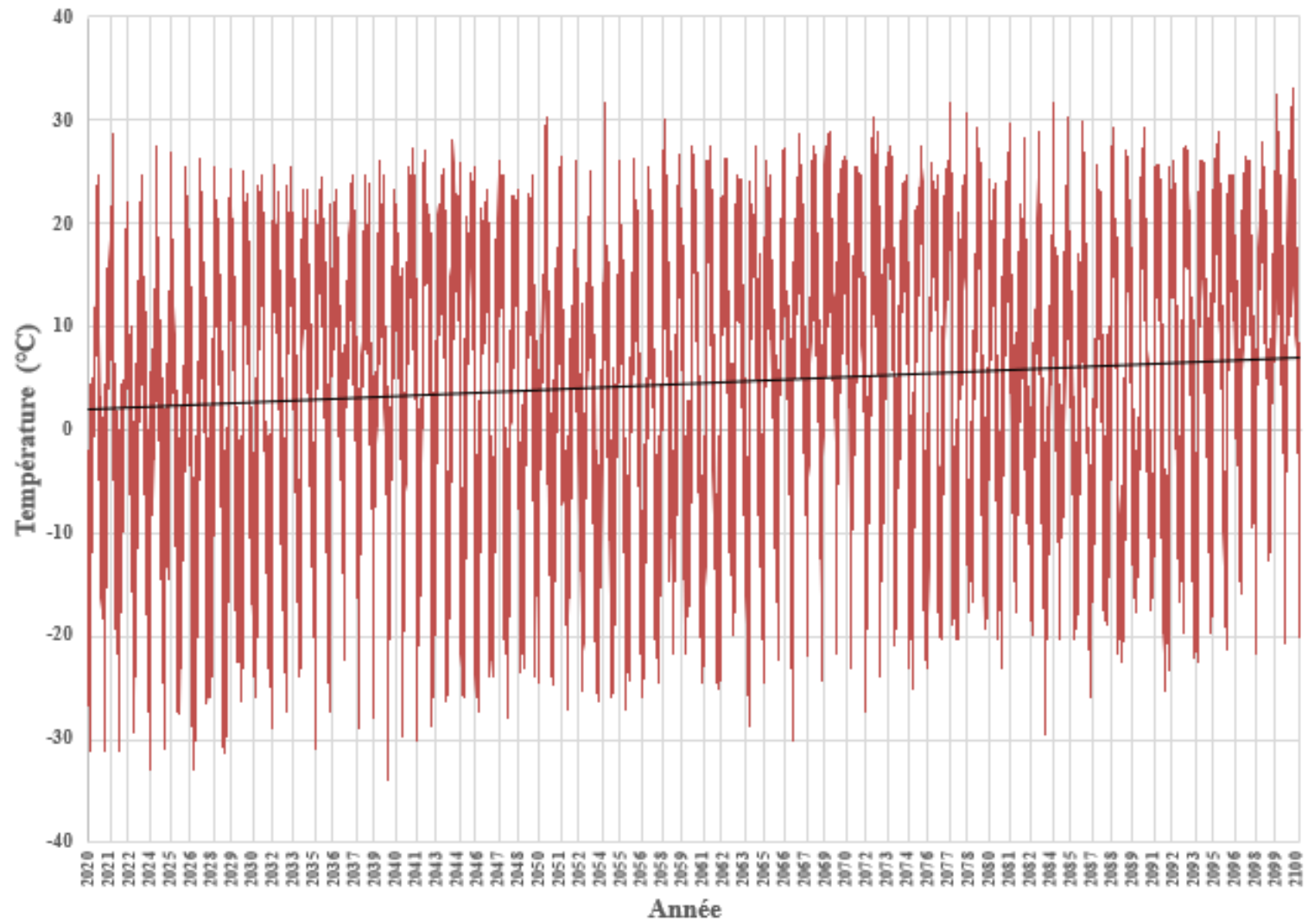


Figure A.26 : Évolution des températures moyennes journalières obtenues par simulation climatique à partir du modèle climatique GFDL-ESM2G



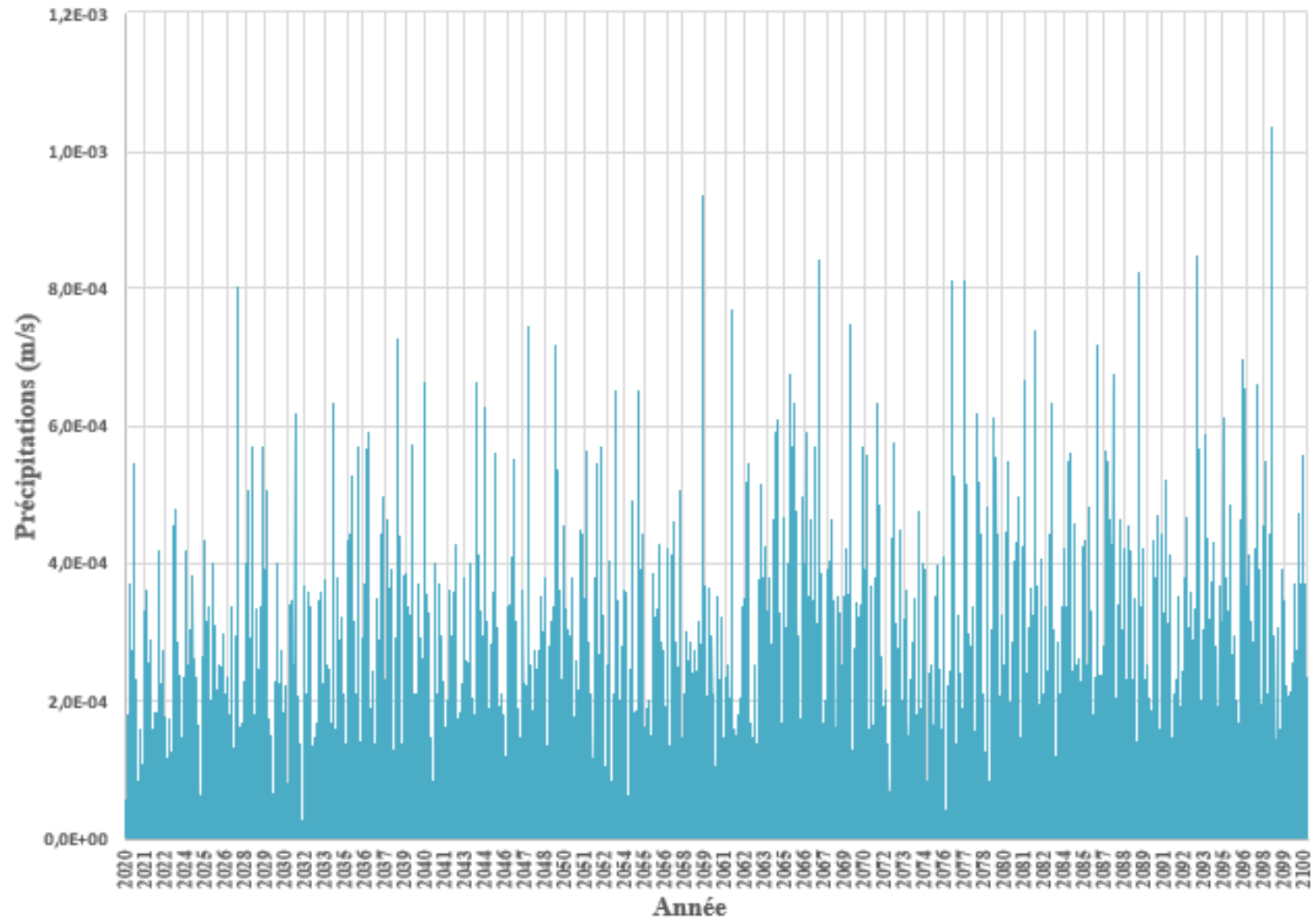


Figure A.27 : Évolution des précipitations moyennes journalières obtenues par simulation climatique à partir du modèle climatique GFDL-ESM2G

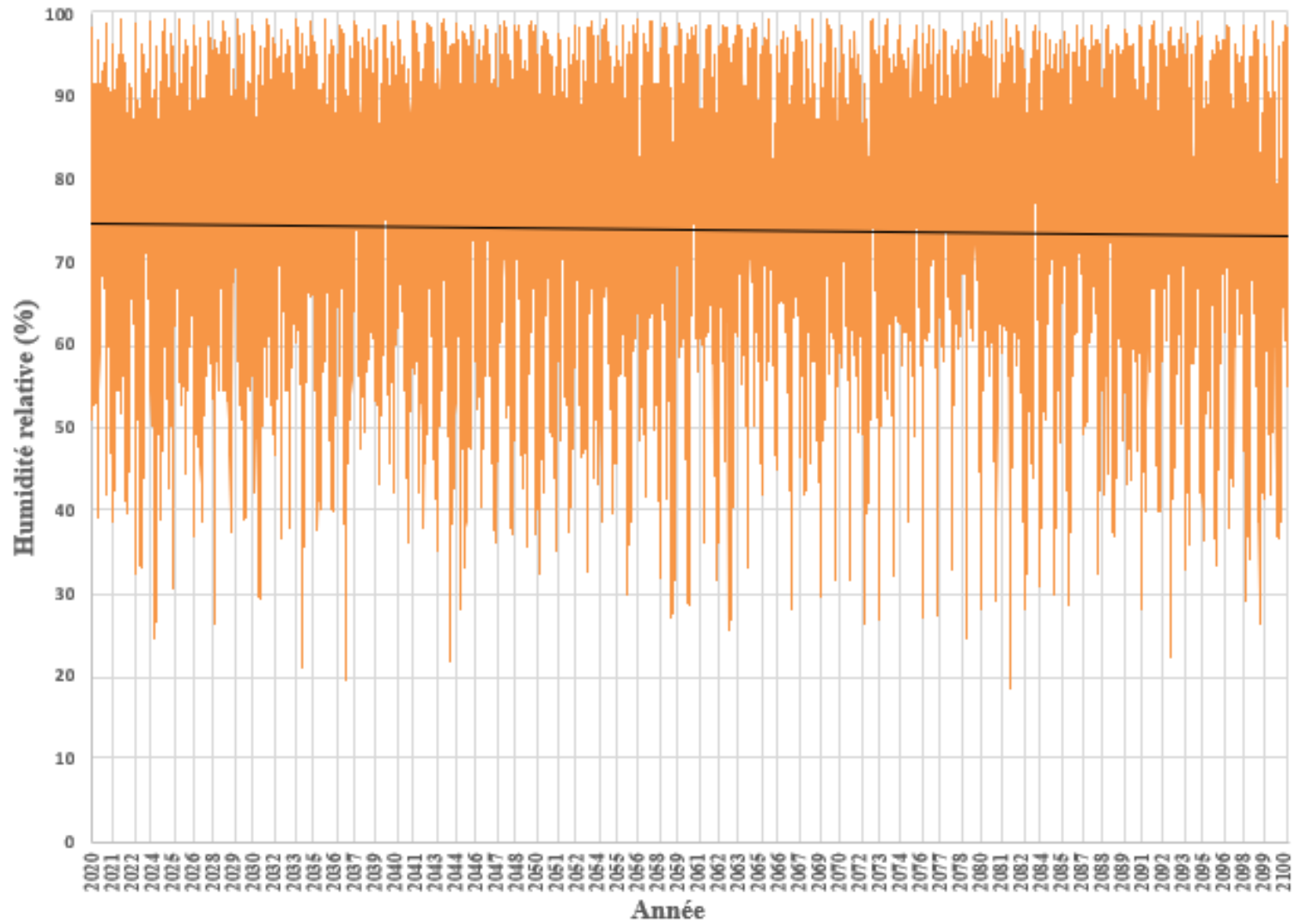


Figure A.28 : Évolution de l'humidité relative moyenne journalière obtenue par simulation climatique à partir du modèle climatique GFDL-ESM2G

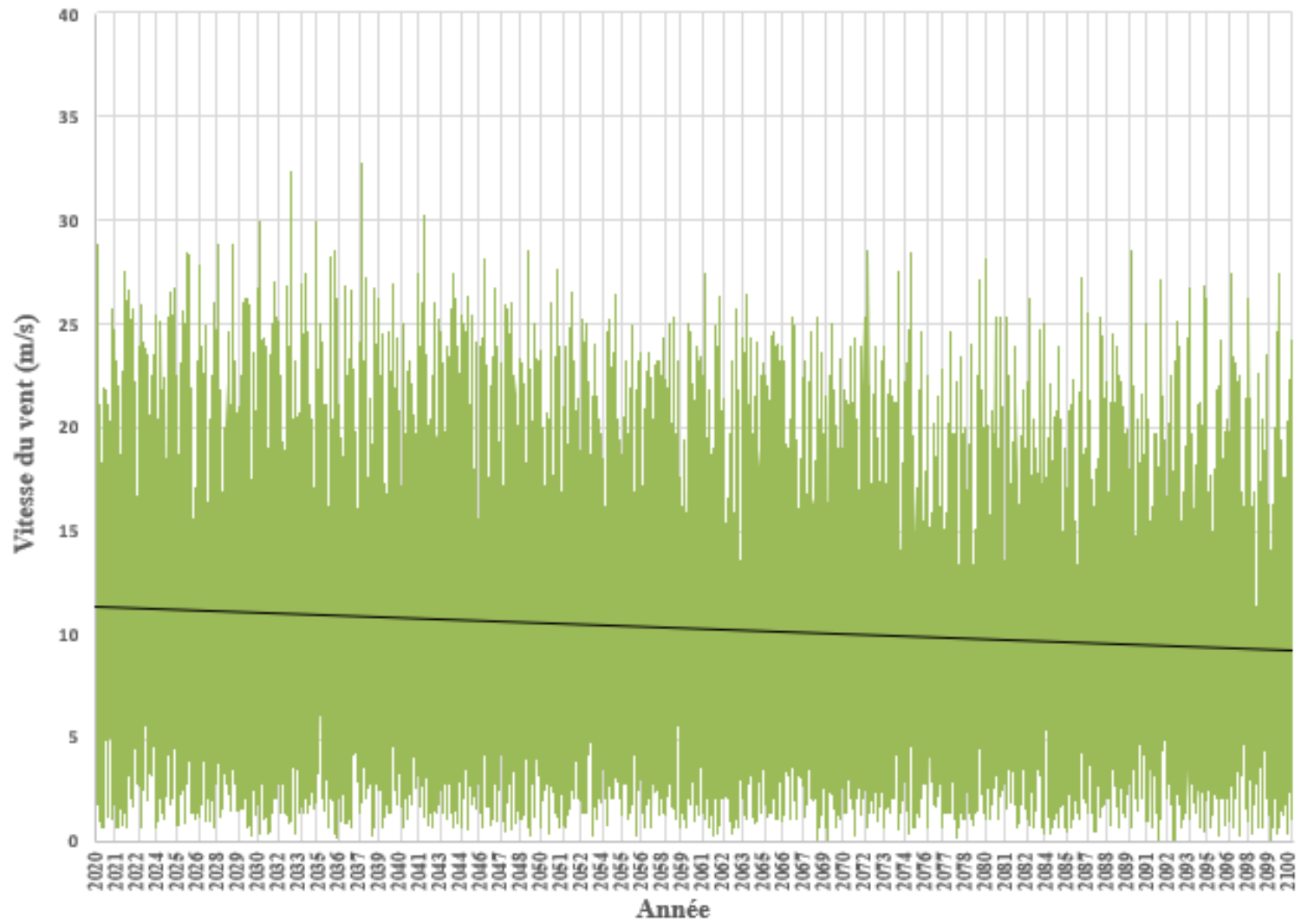


Figure A.29 : Évolution de de la vitesse du vent moyenne journalière obtenue par simulation climatique à partir du modèle climatique GFDL-ESM2G